Affaires indiennes et du Nord Canada
Indian and Northern Affairs Canada

Étude environnementale n° 14

Études des bassins à boue II - perturbations géothermiques des terrains pergélisolés adjacents aux emplacements de puits de pétrole et de gaz

Programme des affaires du Nord

Étude environnementale nº 14

Études des bassins à boue II – perturbations géothermiques des terrains pergelisolés adjacents aux emplacements de puits de pétrole et de gaz

Programme des affaires du Nord

H.M. French
Département de géographie
et de planification régionale
Université d'Ottawa
Ottawa
M.W. Smith
Département de géographie
Université Carleton
Ottawa

© Publié avec l'autorisation de
l'hon. John C. Munro, c.p., député,
ministre des Affaires indiennes
et du Nord canadien,
Ottawa, 1981.
QS-8257-000-FF-A1
Nº de catalogue: R71-19/14-1981F
ISBN 0-662-90690-X

Le présent rapport a été rédigé sous contrat pour le Programme de recherches sur l'utilisation des terres arctiques, Division des études environnementales, Direction de la protection de l'environnement du Nord, MAINC.

Les opinions, conclusions et recommandations contenues dans le présent rapport sont celles des auteurs et ne reflètent pas nécessairement celles du Ministère.

This report is also available in English.

REMERCIEMENTS

Le projet d'étude des bassins à boue du Programme de recherches sur l'utilisation des terres arctiques est financé par l'Arctic Petroleum Operators' Association, de Calgary (projet 132 de l'APOA). Nous sommes très reconnaissants de la participation active et de la coopération de la Panarctic Oils Limitée et de la Gulf Canada Limitée, qui nous ont donné accès aux puits, nous ont logés sur le chantier, au besoin, et ont mis à notre disposition le matériel et le personnel sur place. Parmi les personnes qui ont participé au projet à diverses occasions, citons B. Burrows, D. Connelly, R.G.S. Currie, L.J. Franklin, Mlle S. Jones et L. Storvold, tous de la Panarctic Oils Limitée de Calgary, et J. Guthrie, A. Habermeyer et G. Habke, de la Gulf Canada Limitée de Calgary. T. Beck, de l'Aquitaine du Canada Limitée de Calgary, et R.G.S. Currie, de la Panarctic Oils Limitée de Calgary, ont joué un rôle important dans la planification générale et la mise en oeuvre du programme de surveillance des bassins à boue.

Une aide logistique supplémentaire nous a été apportée par l'Etude du plateau continental polaire du ministère de l'Energie, des Mines et des Ressources, sous la direction de G.D. Hobson, dans le cadre du projet de l'EPCP 75-37, et par la Section de l'utilisation des terres du ministère des Affaires indiennes et du Nord, de Yellowknife, sous la direction de D. Longlitz.

Les auteurs tiennent à remercier A.G. Lewkowics, D. Paterson et A. Tvede de leur aide précieuse au moment de la construction, de la pose et de la surveillance subséquente des câbles à thermistors, aux deux emplacements, à diverses occasions. Nous aimerions en outre remercier chaleureusement le personnel de la Gulf Canada en poste à Swimming Point, en particulier D. Sasniuk, qui a effectué les relevés mensuels au puits M-31 de mars 1977 à août 1978.

RESUME

Deux bassins à boue, l'un à l'emplacement du puits Bent Horn 1-01 de la Panarctic, dans l'île Cameron (76°N, 104°O), et l'autre à l'emplacement du puits Ogruknang M-31 de la Gulf, dans les monts Caribou (69°N, 134°O), ont été munis d'instruments durant l'hiver 1976-1977 pour surveiller les conditions géothermiques du pergélisol environnant. Nous nous sommes servis de la simulation numérique établie d'après les données sur le terrain pour prédire les modifications géothermiques. Le forage du puits Bent Horn 1-01 n'a duré qu'un seul hiver; celui du puits Ogruknang M-31 a duré deux saisons hivernales, et le bassin à boue y est demeuré béant pendant l'été pour être remblayé au cours du second hiver.

Au puits 1-01, des données éparses révèlent que les fluides gèlent presque instantanément dès leur entrée dans le bassin à boue et qu'ils restent gelés après la remise en état de l'emplacement. Au puits M-31, les fluides n'étaient pas gelés complètement au moment du remblayage. Dans les deux emplacements, les températures du pergélisol sous le bassin se sont beaucoup élevées pendant la période du forage du puits. Les données du puits M-31 révèlent a) que les températures à une profondeur de 0,5 m sous le fond du bassin à boue s'élevaient rapidement, passant de -14 à -4°C pendant les premiers temps d'utilisation du bassin, pour ensuite s'élever lentement jusqu'à 0,5°C à la mi-septembre 1977, b) que le dégel du pergélisol à l'été de 1977 a été restreint aux parois du bassin, c) qu'à une profondeur de 2,5 m sous le fond du bassin, les perturbations géothermiques deviennent minimes et d) qu'en 1978, les températures à une profondeur de 2,0 m sous le fond du bassin avaient presque atteint l'équilibre de -1 à -2°C.

Ces données indiquent que l'utilisation de bassins souterrains pour recueillir les fluides de forage dans les deux localités susmentionnées n'entraînera pas la dégradation du pergélisol et qu'ils finiront par geler in situ, même s'ils ne l'étaient pas complètement au moment du remblayage. Ces conclusions ne s'appliquent pas aux régions à pergélisol plus chaud et (ou) à températures estivales plus élevées.

TABLE DES MATIERES

		Page
	REMERCIEMENTS	i
	RESUME	ii
	LISTE DES TABLEAUX	v
	LISTE DES FIGURES	vi
1.	PROJET D'ETUDE DES BASSINS A BOUE DU PROGRAMME DE RECHERCHES SUR L'UTILISATION DES TERRES ARCTIQUES	1
2.	INTRODUCTION	2
3.	OBJECTIFS ACTUELS	4
4.	PROGRAMME DE SURVEILLANCE GEOTHERMIQUE	12
	4.1 Emplacement du puits Bent Horn 1-01 de la Panarctic, dans l'île Cameron	12
	4.2 Emplacement du puits Ogruknang M-31 de la Gulf, dans les monts Caribou	13
	4.3 Instruments	14
5.	MODELE INFORMATIQUE	20
6.	RESULTATS	24
	6.1 Introduction	24
	6.2 Exactitude des prévisions	28
	6.3 Ogruknang M-31	36
	6.3.1 Modifications géothermiques	36
	6.3.2 Utilisation d'une couche isolante	38
	6.3.3 Regel des fluides en bassin à boue	38
	6.4 Bent Horn 1-01	42
	6.4.1 Introduction	42
	6.4.2 Modifications géothermiques	42
	6.5 Problèmes de remise en état des emplacements des puits Bent Horn 1-01 et Ogruknang M-31	45
7.	RESUME	46
	7.1 Perturbations géothermiques dans les bassins à boue	46
	7.2 Incidences sur le Règlement sur l'utilisation des terres arctiques	47

8. BIBLIOGRAPHIE 50

ANNEXE - Géoisothermes enregistrés et prévus aux câbles G et K, à l'emplacement du puits Ogruknang M-31 de la Gulf, dans les monts Caribou. 52

LISTE DES TABLEAUX

		Page
1.	Propriétés thermiques du sol à l'emplacement du puits M-31, évaluées selon la granulométrie, la densité apparente et la teneur en humidité, d'après la méthode de Johansen (1973).	25
2.	Classification des emplacements des puits d'exploration examinés en 1976 et en 1977, d'après les méthodes d'exploitation, et problèmes actuels dus aux bassins à boue et (ou) à d'autres causes.	26
3.	Analyse des problèmes posés par les bassins à boue.	27

LISTE DES FIGURES

		Page
1.	A - Emplacement du puits Bent Horn 1-01 de la Panarctic Oil Limitée, île Cameron, Arctique supérieur.	5
	B - Photographie aérienne de la région de Bent Horn, dans le sud-ouest de l'île Cameron (A 16761-122), montrant l'emplacement du puits Bent Horn 1-01.	5
2.	A - Emplacement du puits Ogruknang M-31 de la Gulf Canada Limitée, monts Caribou, delta du Mackenzie.	6
	B - Photographie aérienne du côté ouest des monts Caribou (A 24053-52), montrant l'emplacement du puits M-31.	6
3.	A - Vue aérienne oblique du terrain de toundra couvert de végétation dans les environs de Bent Horn, dans le sud-ouest de l'île Cameron, 14 août 1977. Remarquez les lignes d'infiltration prononcées.	7
	B - Vue au sol du terrain adjacent au puits Bent Horn 1-01 (à l'arrière-plan), 11 août 1977.	7
	C - Vue aérienne oblique de l'emplacement du puits Ogruknang M-31 de la Gulf après sa remise en état, 4 août 1978. Remarquez le réseau polygonal étendu de fissures gélivales à l'emplacement.	8
	D - Vue au sol du terrain adjacent au puits Ogruknang M-31, montrant des auges peu profondes dues aux fissures gélivales et à la végétation de toundra et de saules, 4 août 1978.	8
4.	Plan de l'emplacement du puits Bent Horn 1-01, île Cameron.	9
5.	Mise en place d'instruments au bassin à boue du puits Bent Horn 1-01, octobre-novembre 1976.	
	A - Sautage du bassin à boue, 2 novembre 1976.	10
	B - Fente de glace exposée dans la paroi du bassin à boue au moment de sa construction. On voit ici une section transversale de la fente, l'explosion ayant détruit la structure feuilletée de la glace. Les matériaux environnants sont des grès glauconieux, 5 novembre 1976.	10

C - Forage de trous de sonde à l'aide d'une installation sismique dans le fond du bassin à boue, 6 novembre 1976. 11

D - Tableau de contrôle des câbles à thermistors une fois terminé, 8 novembre 1976. 11

6. Plan de l'emplacement du puits Ogruknang M-31 de la Gulf, monts Caribou. 15

7. Mise en place d'instruments au bassin à boue du puits Ogruknang M-31, monts Caribou, avril 1977.

A - Vue générale du bassin à boue du puits M-31 en construction, 2 avril 1977. 16

B - Petite fente de glace exposée dans la paroi du bassin à boue. Les matériaux environnants sont du sable et du gravier. Les parois du bassin ne renfermaient aucune masse volumineuse de glace, contrairement au sol situé sous le fond (voir figure 8), 3 avril 1977. 16

C - Echantillonnage des déblais de forage des trous de sonde des thermistors pour en connaître la granulométrie, la densité apparente et la teneur en glace dans le sol, 3 avril 1977. 17

D - Tableau de contrôle des câbles à thermistors une fois terminé, 12 avril 1977. 17

8. Stratigraphie de l'emplacement du puits Ogruknang M-31 de la Gulf, telle que déterminée à partir de l'inspection sur le terrain et de l'analyse des déblais de forage des trous de sonde. Remarquez la masse volumineuse de glace se trouvant à une profondeur de 2-5 mètres sous le fond du bassin à boue et les teneurs généralement faibles en glace des matériaux composant les parois. 18

9. Transect de température du trou de sonde au puits Ogruknang M-31 de la Gulf, montrant l'emplacement des trous de sonde C à N et le positionnement des thermistors YSI. Un autre câble, W, mesurant les températures du fond du bassin à boue et des fluides s'y trouvant a été posé le long du fond et des parois. (Le bassin à boue du puits Bent Horn 1-01 a été doté d'instruments semblables). 19

10. Données géométriques d'entrée et disposition des éléments finis pour le modèle informatique utilisé pendant l'étude. 21

11. Conditions limites de température en surface enregistrées au puits M-31 et utilisées pour les simulations thermiques de bassins à boue. Les points 1 à 10 se rapportent au thermistor W-10 s'étendant sur le fond du bassin, les points 11 à 13 au thermistor W-4 posé sur la paroi du bassin (vers avril-juillet) ou à la température de l'air ambiant (vers août-décembre), les points 14 à 21 aux températures en surface du sol à l'extérieur du bassin. Les données couvrent la période du 18 avril au 31 décembre 1977. 22

12. Conditions thermiques, telles que prédites à partir des données observées, bassin à boue du puits M-31, 23 mai 1977 et 19 juin 1977. 29

13. Conditions thermiques, telles que prédites à partir des données observées, bassin à boue du puits M-31, 17 juillet et 14 août 1977. 30

14. Conditions thermiques, telles que prédites à partir des données observées, bassin à boue du puits M-31, 25 septembre et 9 octobre 1977. 31

15. Conditions thermiques, telles que prédites à partir des données observées, bassin à boue du puits M-31, 30 octobre et 13 novembre 1977. 32

16. Températures du sol sous le fond du bassin à boue du puits M-31, telles qu'illustrées par les données obtenues avec le câble G (voir figure 9 pour l'emplacement de ce cable) du 4 avril au 31 décembre 1977. 33

17. Simulation des effets d'une mousse isolante d'uréthane de 10 cm d'épaisseur sur le dégel a) d'un sol minéral et b) de la glace. 34

18. Températures des fluides du bassin à boue du puits M-31, du 18 septembre au 29 octobre 1977. 35

19. Températures des fluides du bassin à boue du puits M-31, du 13 novembre au 25 décembre 1977. 39

20. Températures des fluides du bassin à boue du puits M-31, du 8 janvier au 19 février 1978. Les travaux de remblayage du bassin ont débuté le 20 février 1978 (voir figures 24 C et 24 D). 40

21. Remise en état des emplacements des puits Bent Horn 1-01 et Ogruknang M-31.

A - Puits Bent Horn 1-01, 21 août 1978. Vue aérienne oblique de l'emplacement remis en état. Remarquez que la torchère béante s'est emplie d'eau, mais que le terrain recouvrant le bassin à boue n'a pas glissé. 43

B - Emplacement du puits Bent Horn 1-01, 21 août 1978. Restes du tableau de contrôle et des câbles à thermistors; seulement cinq des treize câbles fonctionnaient encore. La surface du bassin à boue était sèche et compactée. 43

C - Emplacement du puits Ogruknang M-31, 2 mars 1978. Vue du bassin à boue au début de son remblayage. Les matériaux se trouvant à l'arrière-plan sont poussées dans le bassin. Remarquez la neige dans le bassin. 44

D - Emplacement du puits Ogruknang M-31, 10 mars 1978. Vue du bassin à boue à demi remblayé. Le poids de la couverture provoque la remontée des fluides du bassin non gelés et le craquement de la surface gelée du bassin. Peu après, la surface du bassin "s'est rompue" (Voir figure 3 C pour une photographie de l'emplacement remis en état, 4 août 1978). 44

1. PROJET D'ETUDE DES BASSINS A BOUE DU PROGRAMME DE RECHERCHES SUR L'UTILISATION DES TERRES ARCTIQUES

Un des objectifs du projet est de recueillir des données environnementales et géotechniques sur la construction, l'utilisation et la remise en état des bassins à boue aménagés dans différents types de terrains pergélisolés. Il vise également à évaluer d'autres méthodes d'élimination des fluides de forage, en particulier leur épandage direct sur la toundra. Un objectif à long terme est d'évaluer l'efficacité du Règlement sur l'utilisation des terres arctiques en ce qui concerne le forage de puits de pétrole et de gaz dans le pergélisol et l'élimination des fluides ainsi produits.

Le projet comporte quatre phases.

La première a débuté pendant les étés 1976 et 1977. Elle consistait à effectuer, dans l'Arctique, un relevé des emplacements de puits abandonnés et en exploitation d'âges divers et situés dans différents terrains et environnements pergélisolés. Les objectifs étaient de cerner les raisons de la réussite ou de l'échec des bassins à boue, d'établir l'historique des faits et une documentation sur les problèmes soulevés par les bassins à boue, et d'identifier les localités où il aurait été préférable d'effectuer le forage sans aménager un tel bassin.

Une deuxième phase, entreprise pendant l'hiver 1976-1977, consistait à munir d'instruments deux bassins à boue en vue de surveiller les modifications thermiques, géomorphiques et du pergélisol associées à l'exploitation, à la remise en état et à l'abandon de ces bassins. Les phénomènes suivants présentaient un intérêt particulier: a) l'influence des fluides en bassin à boue sur les régimes thermiques du pergélisol; b) la question de savoir si, oui ou non, ces fluides gèlent in situ et la détermination de la période de ce phénomène; et c) la nature et le degré d'activité thermokarstique qui peut en résulter. Un bassin à boue, au puits Bent Horn 1-01 de la Panarctic Oils Limitée, dans l'île Cameron, a été doté d'instruments en novembre 1977. Un second bassin à boue, au puits Ogruknang M-31 de la Gulf Canada Limitée, dans les monts Caribou dans le delta du Mackenzie, a été muni d'instruments en avril 1977. La surveillance plus ou moins intensive de ces deux emplacements s'est poursuivie jusqu'à l'été de 1978.

Une troisième phase consistait à élaborer des modèles numériques reflétant les effets thermiques des fluides en bassin à boue sur le pergélisol environnant. Les modèles obtenus ont été confrontés avec les données obtenues sur le terrain dans les emplacements surveillés.

La quatrième phase du projet comportait l'étude de la toxicité des boues résiduelles de forage et de leurs effets sur la végétation. Un déversement expériemental de ces boues a été effectué au puits Siku-21 de la Gulf dans le delta du Mackenzie en janvier 1978, dans une localité où un inventaire détaillé de la flore et de

l'emplacement avait été dressé l'été précédent. De plus, un certain nombre d'anciens emplacements de puits des îles de l'Arctique supérieur et du delta du Mackenzie ont été visités en 1977 pour étudier les effets de la fuite des fluides de forage et établir des historiques des faits.

Le personnel travaillant au projet d'étude des bassins à boue sont H.M. French, du Département de géographie et de planification régionale de l'Universitée d'Ottawa, qui est chargé de la coordonnation du projet et des études sur le terrain, M.W. Smith, du Département de géographie de l'Université de Carleton, qui est chargé des études de simulation par ordinateur et des enquêtes sur le terrain, et D. Smith du Département de botanique et de génétique de l'Université de Guelph, qui est chargé des aspects biologie et toxicité.

Le premier rapport (French, 1978a) ne traite que de la première phase du projet et présente des données de base sur le problème posé par les bassins à boue de même que des observations effectuées pendant les relevés de 1976-1977 et les conclusions tirées à ce moment-là. Le deuxième rapport décrit les programmes de surveillance thermique entrepris aux puits Bent Horn 1-01 et Ogruknang M-31 de la Gulf et compare les données recueillies sur le terrain avec celles obtenues par ordinateur. Un troisième rapport donne un aperçu de la nature de la toxicité, de la végétation et d'autres effets des fluides déposés dans les bassins à boue.

2. INTRODUCTION

Les permis délivrés en vertu du Règlement sur l'utilisation des terres arctiques territoriales exigent que les fluides de forage soient contenus entièrement dans des bassins à boue souterrains, qui doivent être remplis au moment de l'achèvement du puits de sorte que les fluides de forage gèlent in situ dans le pergélisol. Un certain nombre de bio-essais normalisés montrent que les fluides en bassin à boue peuvent poser des problèmes environnementaux ou de toxicité. Bien que leur composition varie et qu'ils subissent continuellement des changements, il semble finalement qu'ils ne constituent pas un apport positif pour la toundra et que leur endiguement est habituellement préférable.

French (1978b), p. 14-16) a décrit certains des problèmes topographiques et environnementaux liés à l'utilisation de bassins à boue. Ils sont brièvement résumés ici. Un premier groupe de problèmes se rapporte à l'influence thermique des fluides en bassin à boue sur le pergélisol environnant, qui peut fondre autour du bassin et sous celui-ci. Ce dégel ne constitue pas un problème majeur si le puits est foré pendant les mois d'hiver, puisque les fluides gèlent habituellement sans tarder dans le bassin. Lorsqu'un puits est foré ou laissé béant pendant l'été, de graves problèmes peuvent survenir. Si le pergélisol environnant est riche en glace, le bassin peut se creuser davantage et ses parois s'effondrer. En règle générale, le degré d'affaissement et la rapidité du phénomène

dépendent de la quantité et de la répartition de la glace dans le sol, de la nature des matériaux constituants et des températures de l'air et du sol à l'emplacement.

Un deuxième groupe de problèmes concerne le non-endiguement des fluides résiduaires de forage.

Dans certains cas, les parois du bassin à boue peuvent exposer les fentes ou les lentilles de glace du pergélisol, d'où la possibilité de fuite du fluide, par exemple par dégel préférentiel le long des fentes de glace. La vitesse de ravinement et de régression par suite de la fonte des fentes de glace peut être rapide, et une telle érosion peut causer un grave sapement de la structure même de la plate-forme de forage. Pour combattre ce problème, on utilise des techniques d'isolation; ainsi, dans le delta du Mackenzie, les manuels de construction des bassins à boue de la Shell Canada suggèrent de placer des dalles préformées de mousse en polyuréthane de 2,4 cm d'épaisseur contre les parois et les filons rocheux (Argument, 1973, p. 8).

La présence d'une grande quantité de glace dans le sol peut soulever des problèmes d'excavation. Habituellement, on fait sauter l'emplacement d'un bassin à l'aide d'explosifs brisants et on enlève les matériaux à l'aide d'équipement lourd de terrassement.

La présence d'une grande quantité de glace dans le pergélisol (p. ex., fentes de glace, masses volumineuses de glace) peut réduire l'efficacité de l'explosion, en raison des propriétés différentes d'élasticité de la glace et d'un sol minéral. Ainsi, le bassin à boue initial peut ne pas être aussi grand que prévu. Dans de tels cas, le volume des fluides peut être tel qu'il faudra un bassin additionnel.

Le troisième groupe de problèmes, et le plus répandu, concerne le remblayage du bassin et la remise en état de l'emplacement*. Les matériaux déblayés au moment de la construction du bassin et mis en tas non loin sont habituellement utilisés pour le remblayage. Cette remise en état est entreprise en hiver lorsque le déplacement des véhicules lourds sur la toundra gelée cause relativement peu de dommages. Si le bassin est resté béant pendant l'été, ou si les activités de forage ont lieu en été, le remblayage ne se fait habituellement pas avant le milieu ou la fin de l'hiver, lorsque les

---

* Remarque du directeur de publication: "La remise en état de l'emplacement" est un terme fréquemment utilisé par l'industrie, mais il est habituellement impossible de remettre un emplacement dans son état originel. Le terme "assainissement" serait plus approprié.

fluides en bassin sont assez gelés pour supporter le poids de la couverture. Le remblayage est habituellement bombé pour prévenir tout affaissement. French (1978a, p. 36-37) a traité d'un certain nombre de problèmes particuliers:

a) L'"effet de volcan" se produit au moment du remblayage du bassin si les fluides ne sont pas complètement gelés. La surface cède sous le poids de la couverture, provoquant la remontée des boues en surface.

b) L'affaissement et l'effondrement du bassin à boue se produit habituellement pendant l'été à la suite de la remise en état. Ce phénomène reflète l'incorporation de neige/glace dans les matériaux de remplissage et (ou) l'infiltration d'eau en aval dans le bassin pendant l'été.

c) Un remblayage insuffisant résultant de la fonte estivale de la glace contenue dans les matériaux de remblayage du bassin et une perte de volume. La dépression ainsi engendrée favorise la formation, au-dessus du bassin, d'une étendue d'eau stagnante qui agit comme un "puits thermique". Ce problème se fait surtout sentir dans les régions où il y a peu d'agrégats.

d) L'échappement des fluides. Ce phénomène peut se produire si les lentilles de glace se trouvant dans les parois du bassin fondent ou si le bassin est trop plein au moment de son remblayage, entraînant l'infiltration de ces fluides dans le mollisol.

e) Un emplacement géographique mal choisi. Si un bassin est situé dans un cours d'eau, il est très possible qu'il soit rongé par l'érosion et que des fluides s'en échappent.

f) Perturbations graves du terrain. Ce phénomène est habituellement associé aux activités estivales qui se déroulent dans une toundra riche en glace et à couvert végétal dense et (ou) lorsque des bassins supplémentaires ont été construits et (ou) lorsque des problèmes techniques de forage se présentent.

3. OBJECTIFS ACTUELS

En plus et à la suite du relevé de reconnaissance des anciens emplacements de puits des îles de l'Arctique et du delta du Mackenzie (French 1978a), la nécessité de recueillir des données plus spécifiques a été soulignée en vue d'en arriver à définir des critères concrets pour minimiser les effets de l'élimination des fluides de forage résiduels dans ces régions.

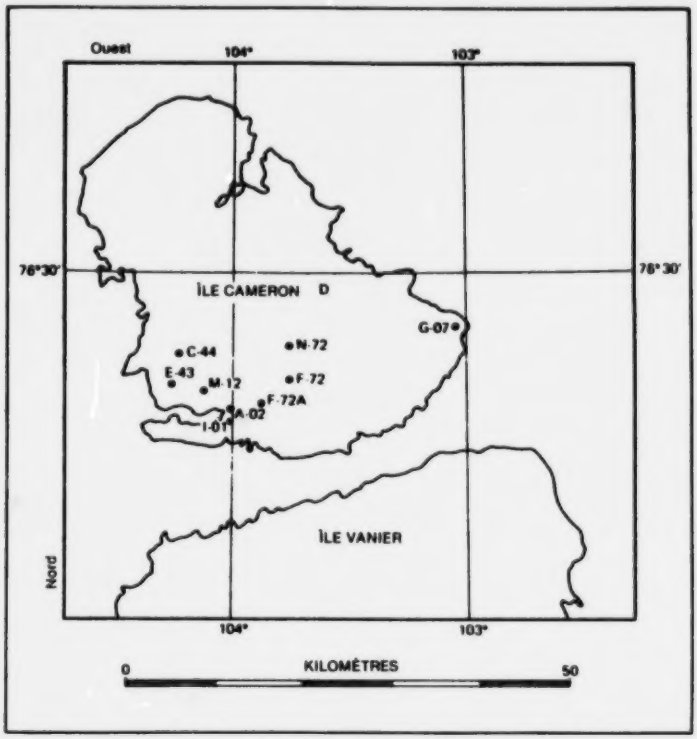


FIGURE 1 A. Emplacement du puits Bent Horn 1-01 de la *Panarctic Oils Limited*, île Cameron, Arctique supérieur.

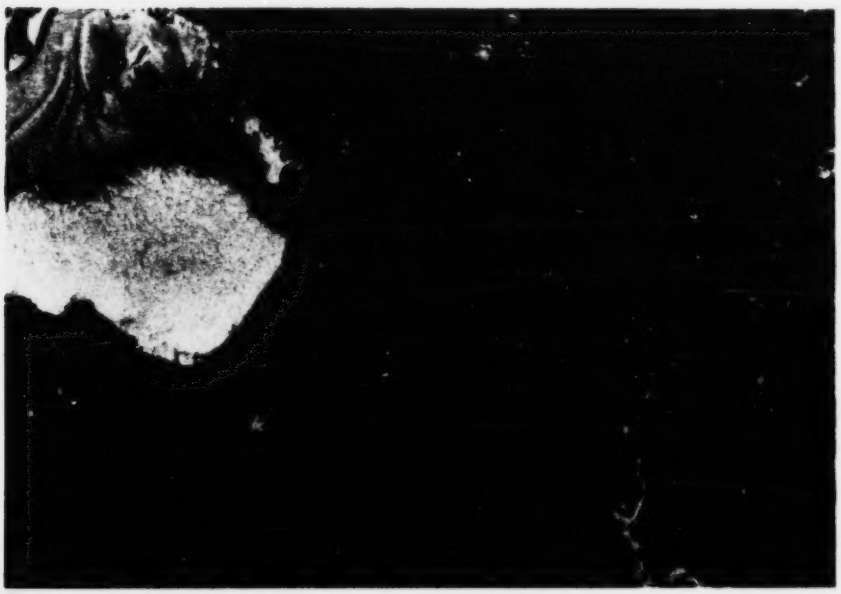


FIGURE 1 B. Photographie aérienne de la région de Bent Horn, dans le sud-ouest de l'île Cameron (A 16761-122), montrant l'emplacement du puits Bent Horn 1-01.

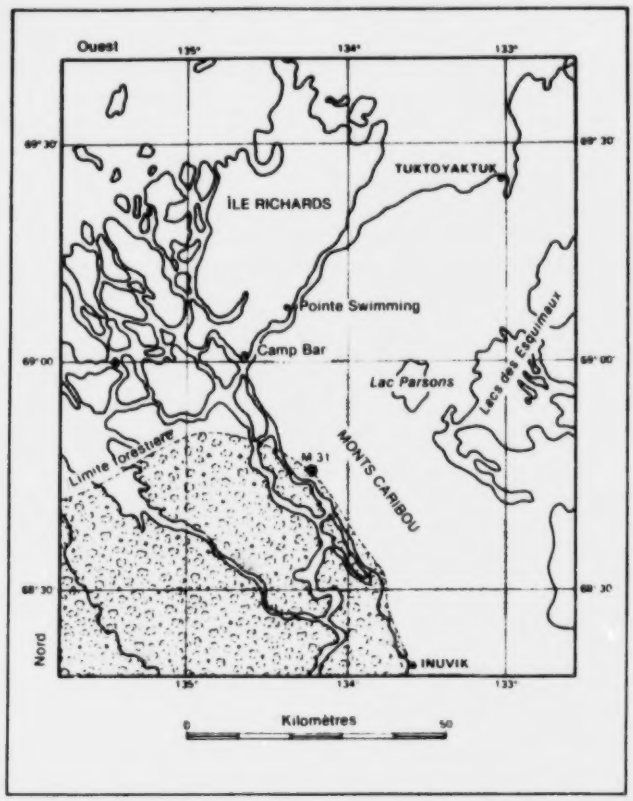


FIGURE 2 A. Emplacement du puits Ogruknang M-31 de la *Gulf Canada Limited*, monts Caribou, Delta du Mackenzie.

FIGURE 2 B. Photographie aérienne du côté ouest des monts Caribou (A 24053-52), montrant l'emplacement du puits M-31.

FIGURE 3 A. Vue aérienne oblique orientée au nord d'un terrain de toundra couvert de végétation dans le voisinage du puits Bent Horn, dans le sud-ouest de l'île Cameron, 14 août 1977. Remarquez les lignes d'infiltration prononcées.

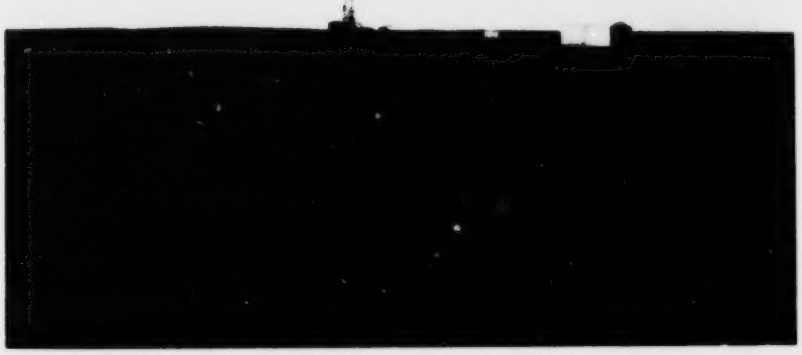


FIGURE 3 B. Vue au sol du terrain adjacent au puits Bent Horn 1-01 (à l'arrière-plan), 11 août 1977.

FIGURE 3 C. Vue aérienne oblique orientée à l'ouest de l'emplacement du puits Ogruknang M-31 de la Gulf après sa remise en état, 4 août 1978. Remarquez le réseau polygonal étendu de fissures gélivales à l'emplacement. Le chenal est du fleuve Mackenzie est à l'arrière-plan.

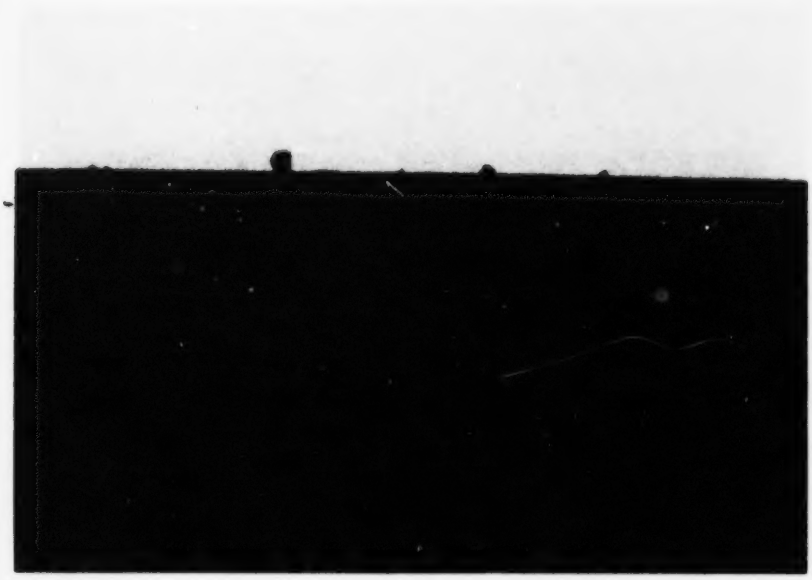


FIGURE 3 D. Vue au sol du terrain adjacent au puits Ogruknang M-31 montrant des auges peu profondes dues aux fissures gélivales et à la végétation de toundra et de saules, 4 août 1978.

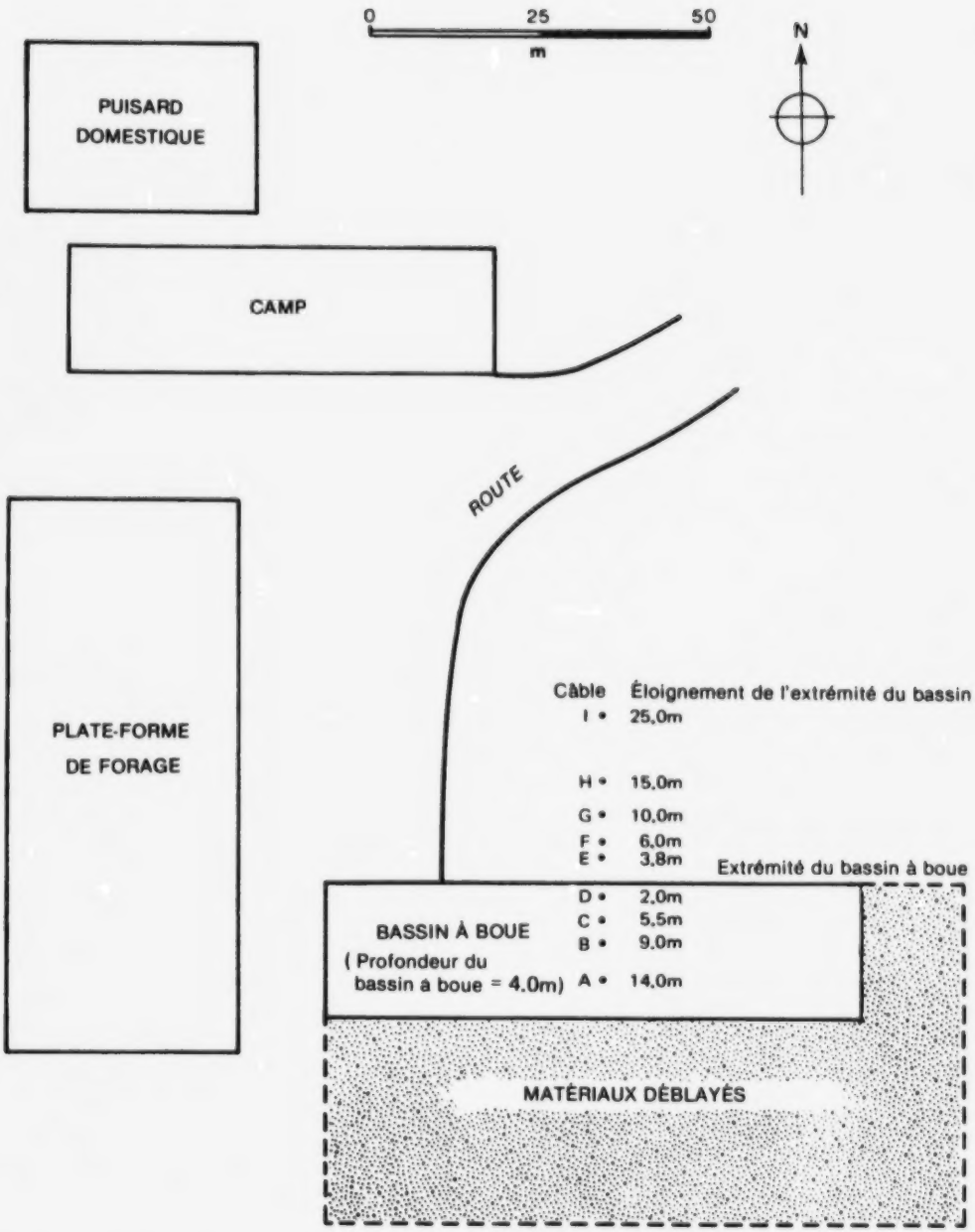


FIGURE 4. Plan de l'emplacement du puits Bent Horn 1-01, île Cameron.

FIGURE 5 A. Emplacement du puits Bent Horn 1-01. Sautage du bassin à boue, 2 novembre 1976.

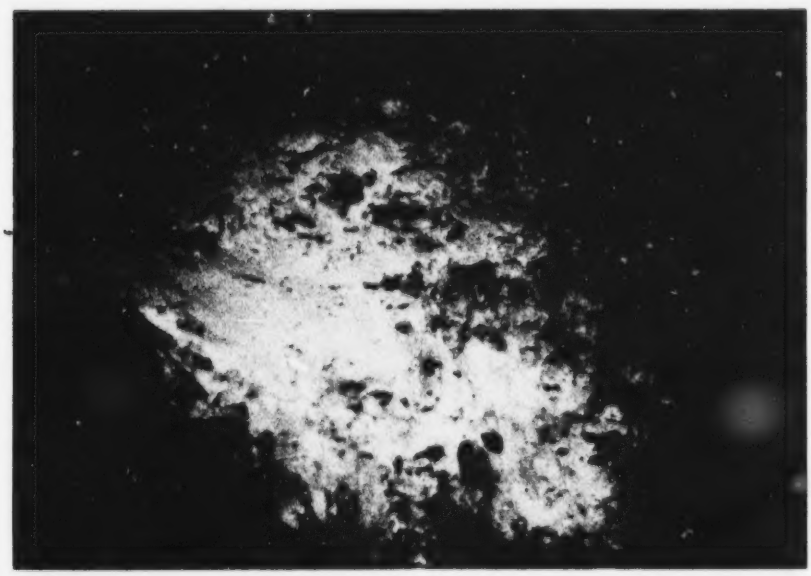


FIGURE 5 B. Emplacement du puits Bent Horn 1-01. Fente de glace exposée dans la paroi du bassin à boue au moment de sa construction. On voit ici une section transversale de la fente, l'explosion ayant détruit la structure feuilletée de la glace. Les matériaux environnants sont des grès glauconieux, 5 novembre 1976.

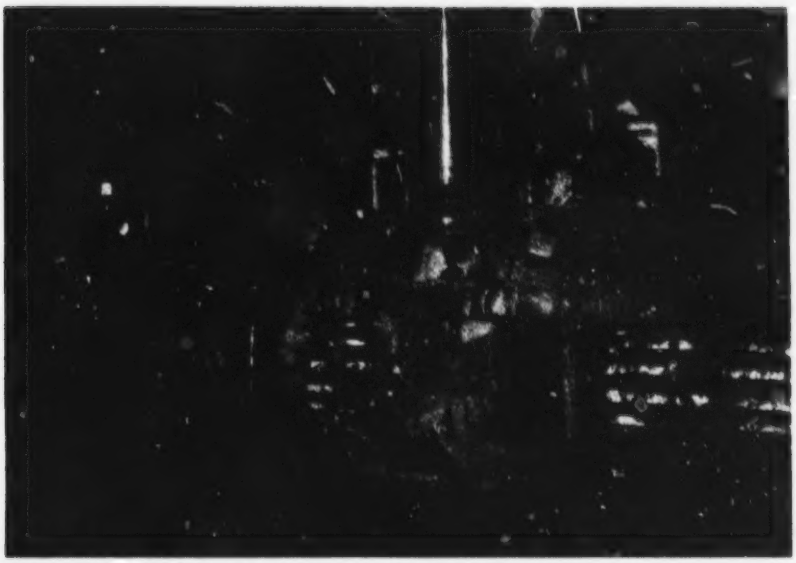


FIGURE 5 C. Emplacement du puits Bent Horn 1-01. Forage de trous de sonde à l'aide d'une installation sismique dans le fond du bassin à boue, 6 novembre 1976.

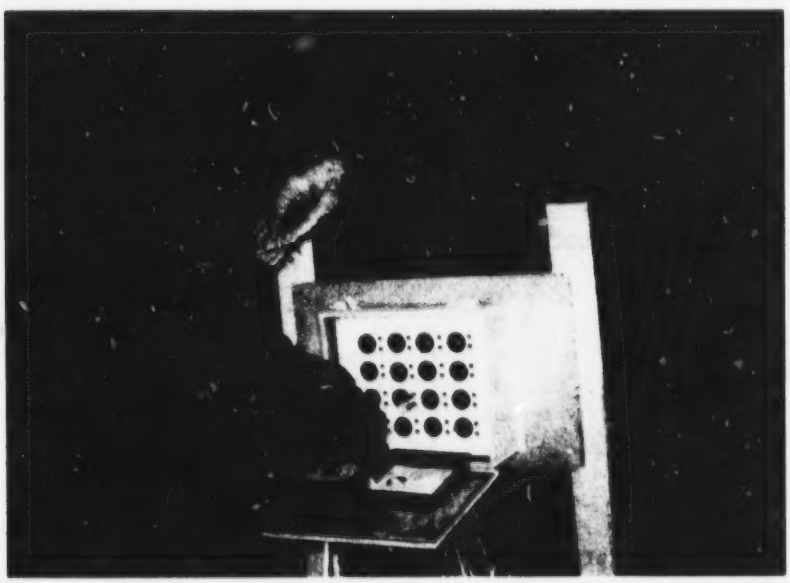


FIGURE 5 D. Emplacement du puits Bent Horn 1-01. Tableau de contrôle des câbles à thermistor une fois terminé, 8 novembre 1976.

Nous ne disposons que de très peu de données quantitatives sur les effets des bassins à boue sur l'environnement et d'aucune série complète d'observations sur toutes les étapes d'exploitation d'un bassin à boue et la remise en état de l'emplacement. C'est pourquoi un programme de surveillance des bassins à boue a été mis sur pied aux deux emplacements mentionnés auparavant pendant 2 périodes de forage différentes. Le programme devait s'attaquer aux problèmes identifiés et étudiés par French (1978a). Nous ne connaissons notamment pas la vitesse à laquelle gèlent les fluides rédisuels de forage et les effets thermiques de la construction d'un bassin à boue et des fluides de forage sur le pergélisol environnant. Les deux nouveaux emplacements de forage ont été choisis (voir ci-après) et munis d'instruments et de dispositifs de contrôle pour obtenir des informations sur les effets thermiques et écologiques des bassins à boue pendant les activités de forage et après la remise en état du site. Les données de base ont également servi à effectuer une simulation par ordinateur pour évaluer les effets géothermiques généraux de l'exploitation d'un bassin à boue conformément au Règlement sur l'utilisation des terres arctiques.

4. PROGRAMME DE SURVEILLANCE GEOTHERMIQUE

Deux bassins à boue ont été munis d'instruments pendant la saison hivernale de forage de 1976-1977, l'un dans un chantier de l'Arctique supérieur (île Cameron), qui fonctionnait uniquement pendant l'hiver, et l'autre dans un chantier de l'Arctique inférieur (monts Caribou, delta du Mackenzie), où les activités se sont poursuivies pendant le printemps, l'été et l'hiver (figures 1 et 2). Outre les différences de périodes, les deux emplacements posaient des problèmes écologiques divers aux activités de forage (voir Smith, D., Etudes des bassins à boue III - à paraître). Le choix des emplacements a été laissé à la discrétion de l'industrie, compte tenu de leurs moyens logistiques.

4.1 Emplacement du puits Bent Horn 1-01 de la Panarctic, dans l'île Cameron

La région de Bent Horn est basse, à pente douce (habituellement 4°) et recouverte d'un tapis végétal dense (figures 3A et 3B). Elle n'est pas caractéristique de la majeure partie de l'île Cameron, qui est modérément disséquée, à couvert végétal épars et dominée par des sols désertiques polaires (Tedrow, 1977). French (1978a, p. 17-21) décrit plus en détail les conditions topographiques de la région de Bent Horn. Les températures enregistrées à l'emplacement du puits Bent Horn N-72 révèlent que le pergélisol atteint -15°C à une profondeur de 50 m (Taylor et Judge, 1977). Ce dernier puits étant situé à environ 1 km du puits 1-01 et dans un terrain semblable, on peut supposer que les températures du pergélisol non perturbé y sont semblables. Ces températures sont caractéristiques de celles enregistrées ailleurs dans les îles de l'Arctique supérieur (Judge, 1973; Mackay, 1974; Brown, 1978).

Le bassin à boue du puits 1-01, qui mesurait 80 x 20 x 4 m (figure 4), a été construit en octobre 1976 et muni d'instruments dès cette époque (figures 5A, 5B, 5C et 5D). Les activités de forage se sont poursuivies jusqu'en avril 1977 et le bassin a été remblayé en mai 1977.

Le bassin à boue a été creusé principalement dans la roche de fond (grès consolidé), qui se rend à moins d'un mètre de la surface. Cette assise rocheuse est recouverte d'un placage de gravier grossier et (ou) de fragments rocheux et d'une couche organique superficielle, surtout de la mousse. Ce tapis organique est d'une épaisseur caractéristique de 5 à 15 cm et peut être arraché. Il constitue une excellente couche isolante pour le pergélisol sous-jacent. French (1978a, p. 17-18) a noté un mollisol d'environ 12 cm en août 1977.

Un réseau bien défini de fentes de glace dissèque l'assise rocheuse. Les fentes ont une profondeur de 2 à 3 m, un espacement de 5 à 10 m et une largeur au sommet de 1 à 2 m (figure 5B). En raison de la couche organique isolante, l'extrémité supérieure des coins de glace se trouve à moins de 15 cm de la surface. Au moment de la construction du bassin à boue, la présence de ce réseau de coins de glace a réduit l'efficacité du sautage et la taille du bassin à boue.

4.2 Emplacement du puits Ogruknang M-31 de la Gulf, dans les monts Caribou

Le delta du Mackenzie, qui date du Pléistocène, se compose de terrains onduleux, quelquefois vallonnés, parsemés de nombreux lacs, bassins lacustres drainés et pingos (voir French, 1978a, p. 22-29). Les matériaux sous-jacents se composent surtout de limon, de sable et de gravier. Des températures annuelles moyennes à la surface du sol de -5 à -7°C ont été enregistrées à l'emplacement des puits et dans les trous de sondage sismique dans les monts Caribou (Mackay 1974; Taylor & Judge, 1977). Même si le volume de la glace peut n'être que de 10%, les lits de glace massive de plusieurs mètres d'épaisseur sont répandus. Le problème majeur lié aux bassins à boue dans cette région est la forte teneur en glace des matériaux sous-jacents. Les parois d'un bassin à boue peuvent mettre à nu de la glace qui fondra en été si elle est exposée, causant ainsi l'agrandissement du bassin.

Le bassin à boue du puits M-31 a été construit en février 1977. Il avait une forme complexe (figure 6) et était séparé en deux sections par un mur. La section principale, mesurant 67 x 30/5 cm, a été munie d'instruments en avril 1977 (figures 7A, 7B, 7C et 7D). Les activités de forage se sont déroulées pendant l'été et se sont terminées en août. Le bassin a été remblayé à la fin de février et au début de mars 1978.

Le bassin à boue a été construit dans un complexe de sable et de gravier fluvio-glaciaires renfermant de petites quantités de limon et d'argile à certaines profondeurs (figure 8). Il y avait de la glace massive à une profondeur de 7 à 12 m, c.-à-d. de 1.5 à 2 m sous le fond du bassin, mais la teneur en glace des 7 m supérieurs était très faible (volume de 10 à 15%). Cela était heureux, car la glace massive exposée dans les parois d'autres bassins à boue de la région du lac Parsons avait engendré des problèmes de fonte pendant l'été (p. ex., puits A-44 du lac Parsons de la Gulf) et (ou) de fuite des fluides (p. ex., puits N-20 du lac Parsons de la Gulf) (voir French 1978a, p. 26-28). La présence de glace massive sous le fond du bassin était toutefois préoccupante, car, si elle devait fondre pendant l'été, elle entraînerait un agrandissement important du bassin.

4.3 Instruments

Des câbles à thermistors (YSI 44033) ont été installés aux deux emplacements lors de la construction des bassins à boue pour obtenir des données sur les températures du sol. Les activités de forage ont été menées à l'aide d'une plate-forme sismique (figures 5C et 7C). Un transect a été établi à partir du milieu du bassin jusqu'à un point où aucune perturbation thermique ne devait se produire (figure 9). Une attention particulière a été accordée aux parois du bassin, même s'il n'était pas utile de forer à plus de 1.5 m. Il a été supposé que les effets se manifestant sur un côté du bassin se répétaient habituellement de l'autre; ce phénomène est donc considéré comme un problème de mi-espace. Les trous de sonde des thermistors ont été forés à 15 m, profondeur à laquelle aucune perturbation thermique détectable ne devait se produire pendant l'existence du bassin. Les thermistors ont été installés à des profondeurs de 0,5, 1, 2, 3, 5, 6, 9, 10, 12 et 15 m. De plus, un câble muni de thermistors espacés d'un mètre a été posé le long des parois et du fond du bassin à boue (câble W) pour surveiller les températures des fluides s'y trouvant. Tous les trous de sonde ont été remblayés avec des déblais de forage.

Au moment du forage, des échantillons de sol et de roc ont été recueillis pour obtenir des données stratigraphiques; ces échantillons ont simplement été prélevés au hasard dans les déblais de forage. Des échantillons intégrés ont été prélevés tous les 1,5 m (5 pi.) pour obtenir une représentation stratigraphique raisonnable. Nous les avons analysés pour connaître leur teneur en humidité, leurs caractéristiques granulométriques et leur densité apparente. Ces renseignements aident à interpréter les données sur les températures du sol et sont nécessaires pour élaborer le modèle informatique.

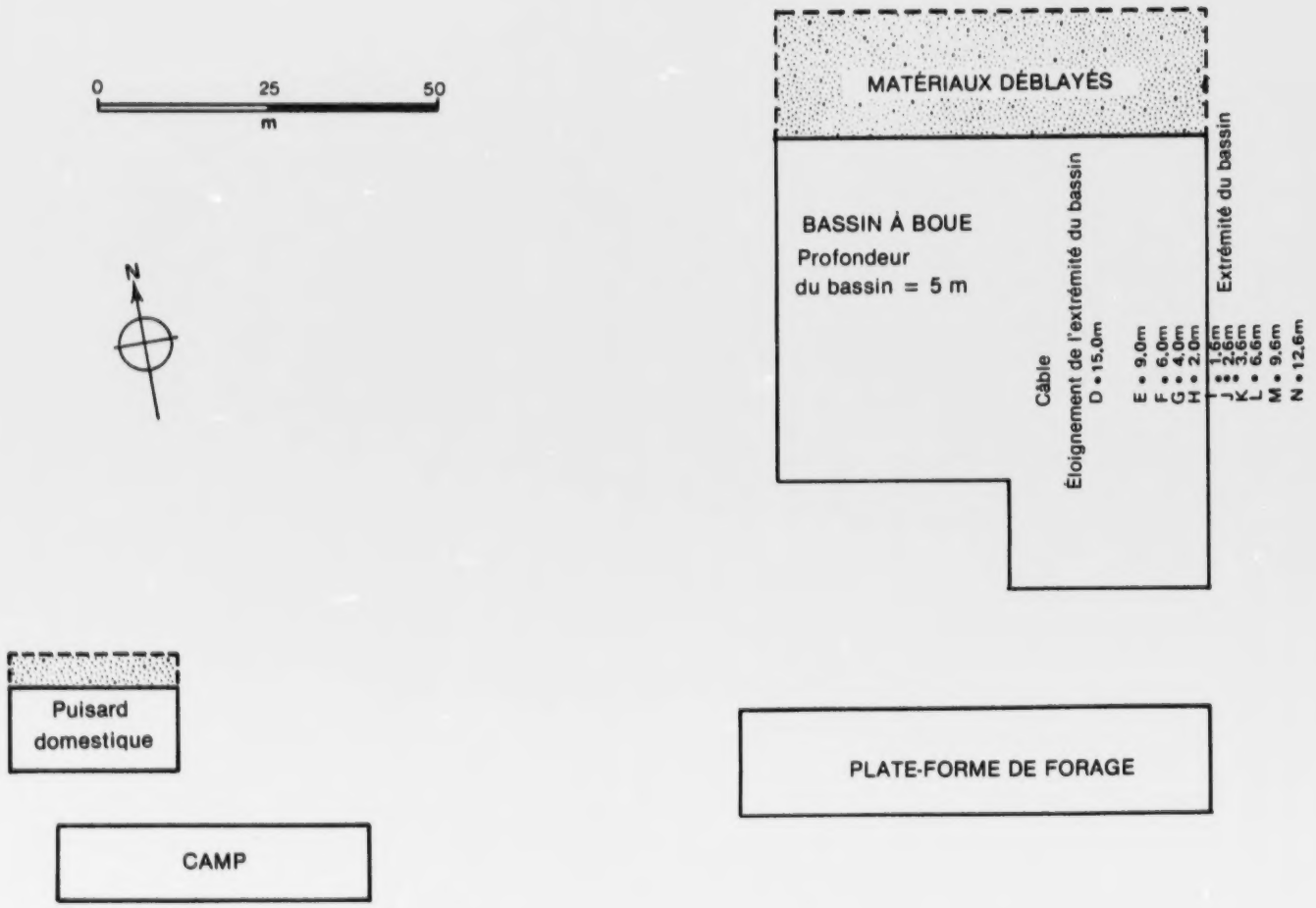


Figure 6. Plan de l'emplacement du puits Ogruknang M-31 de la Gulf.

FIGURE 7 A. Emplacement du puits Ogruknang M-31. Vue générale du bassin à boue en construction, 2 avril 1977.

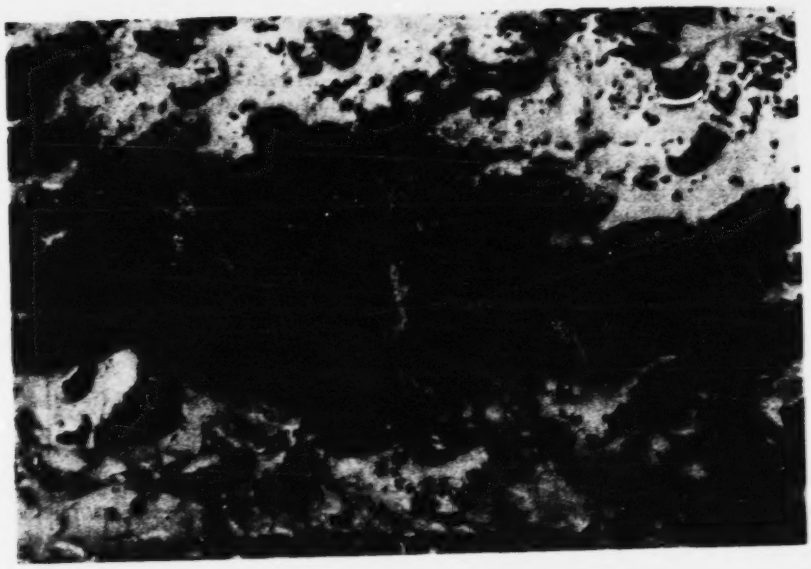


FIGURE 7 B. Emplacement du puits Ogruknang M-31. Petite fente de glace exposée dans la paroi du bassin à boue. Les matériaux environnants sont du sable et du gravier. Les parois du bassin à boue ne renfermaient aucune masse volumineuse de glace, contrairement au sol situé sous le fond (voir figure 8), 3 avril 1977.

FIGURE 7 C. Emplacement du puits Ogruknang M-31. Échantillonnage des déblais de forage des trous de sonde des thermistors pour en connaître la granulométrie, la densité apparente et le degré de glace dans le sol, 3 avril 1977.

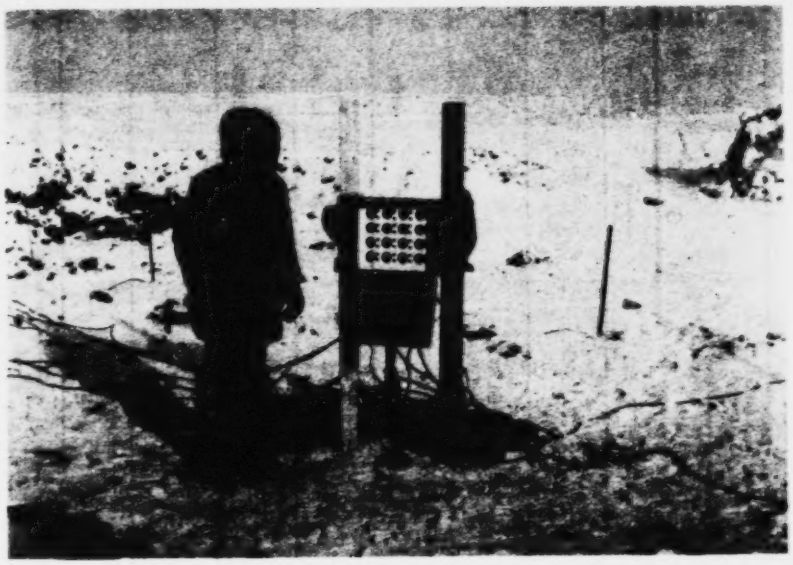


FIGURE 7 D. Emplacement du puits Ogruknang M-31. Tableau de contrôle des câbles à thermistors une fois terminé, 12 avril 1977.

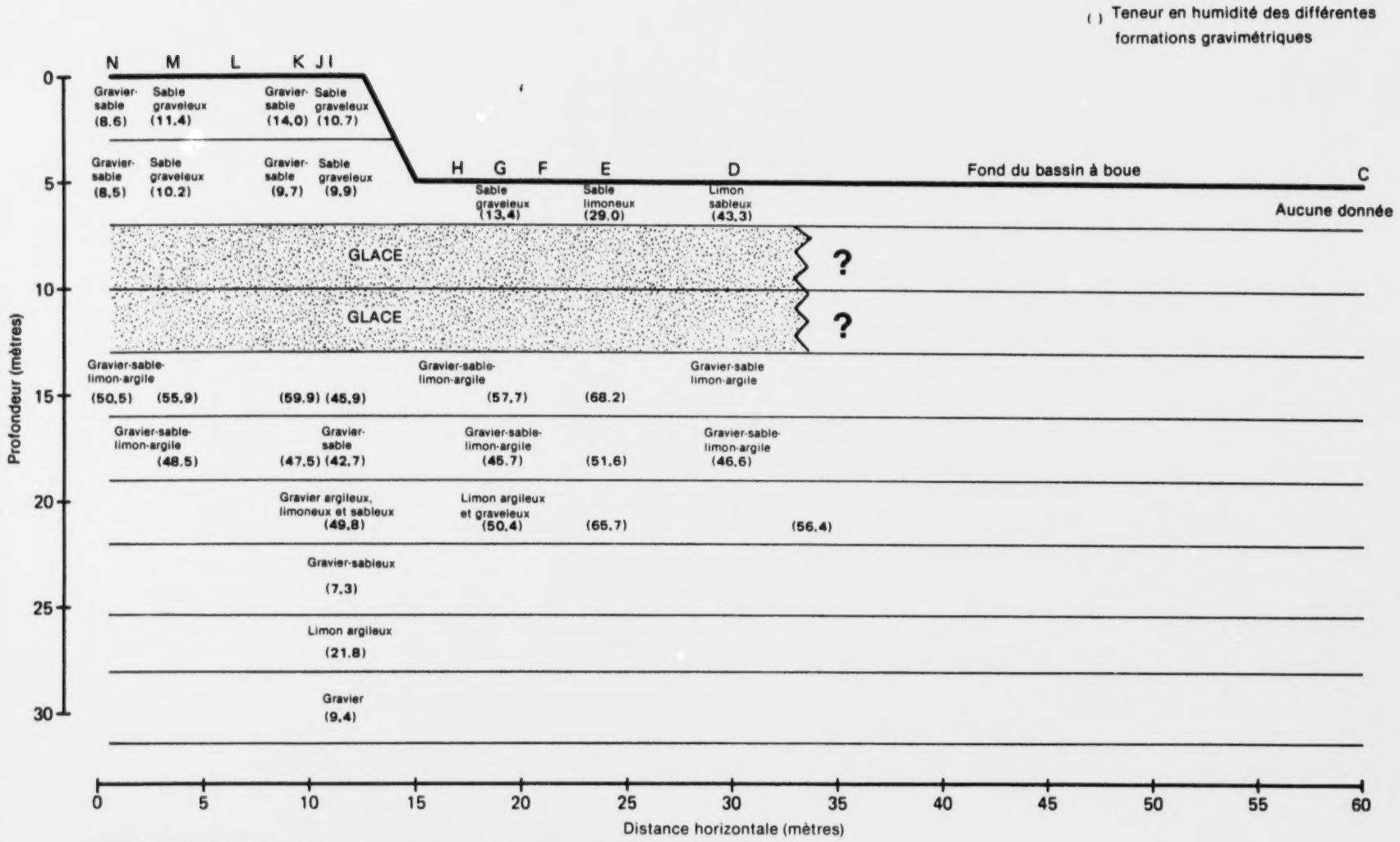


FIGURE 8. Stratigraphie de l'emplacement du puits Ogruknang M-31 de la Gulf, telle que déterminée à partir de l'inspection sur le terrain et de l'analyse des déblais de forage des trous de sonde. Remarquez la masse volumineuse de glace se trouvant à une profondeur de 2-5 m sous le fond du bassin à boue et les teneurs généralement faibles en glace des matériaux composant les parois.

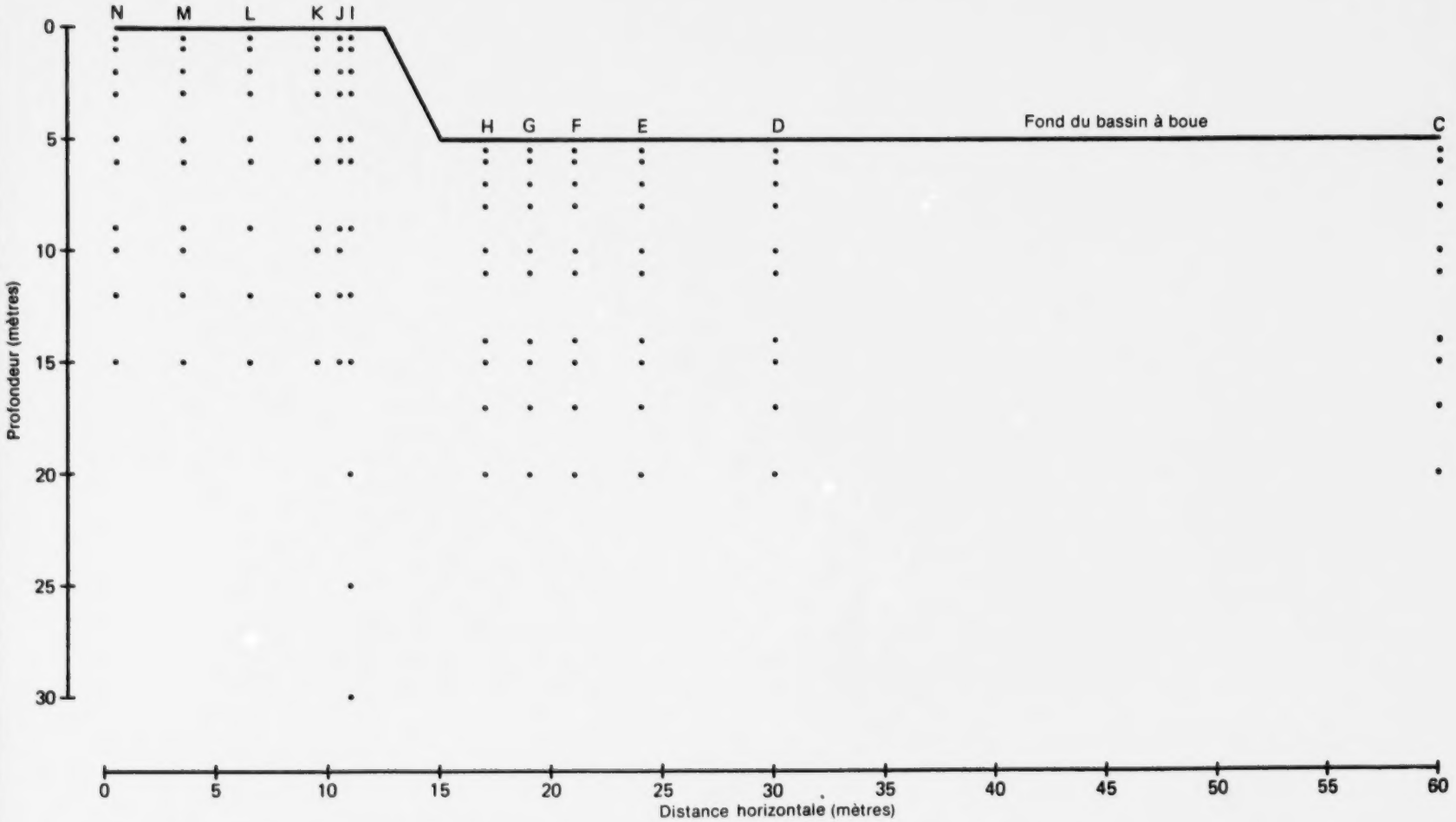


FIGURE 9. Transect de température du trou de sonde, au puits Ogruknang M-31 de la Gulf, montrant l'emplacement des trous de sonde C à N et le positionnement des thermistors YSI. Un autre câble, le W, mesurant les températures du fond du bassin à boue et des fluides s'y trouvant a été posé le long du fond et des parois. (Le bassin à boue du puits Bent Horn 1-01 a été doté d'instruments semblables).

Les câbles à thermistor ont été raccordés à un panneau central de commande (figures 5D et 7D), permettant de lire facilement les températures. Le programme de surveillance a été effectué par le personnel sur le terrain; les relevés ont été faits à la main (à l'aide d'un pont de Wheatstone Biddle 72-430), à intervalles hebdomadaires pendant les activités de forage et à intervalles moins fréquents par la suite. En raison de dommages subis par le matériel et des délais impartis, les données de Bent Horn sont incomplètes. Aucun problème sérieux n'a été rencontré dans les monts Caribou. La section 6, qui examine les résultats, présente donc en premier lieu les données du puits M-31 dans les monts Caribou.

5. LE MODELE INFORMATIQUE

Un objectif majeur de cette phase du projet était d'étudier la structure des modifications géothermiques autour du bassin à boue et d'analyser le problème en fonction de la théorie de la conduction thermique grâce à la modélisation par ordinateur. La simulation informatique permet non seulement de prédire d'une façon détaillée les conditions de température au sol, mais également des événements futurs ou hypothétiques complexes et importants. Ainsi, dans le cas présent, elle permet d'obtenir, sur les conditions de température dans les parois du bassin à boue, des données précieuses qui se sont avérées difficiles à obtenir avec les instruments sur le terrain. Il est même possible d'appliquer la présente analyse d'une façon générale à tout bassin à boue.

Le problème est considéré comme étant un problème de valeur limite bidimensionnelle de température et tient compte des facteurs suivants:

(i) la configuration géométrique réelle (coupe transversale) doit être adaptée;

(ii) la variation stratigraphique de l'emplacement doit être incorporée;

(iii) l'effet de chaleur latente (changement de phase) doit être inclus;

(iv) les conditions limites en surface varient selon l'espace et la période ($TS = f(x,t)$).

Il existe très peu de solutions mathématiques de forme fermée aux problèmes thermiques comportant un changement de phase. Les solutions disponibles sont habituellement unidimensionnelles, pour des configurations géométriques simples, des propriétés matérielles uniformes et des conditions initiales ainsi que des simples perturbations de la température limite. Dans le cas des problèmes complexes, il faut avoir recours à des méthodes numériques. Dans la présente analyse, une formule des éléments finis du problème de conduction thermique transitoire pour l'engel et le dégel des sols

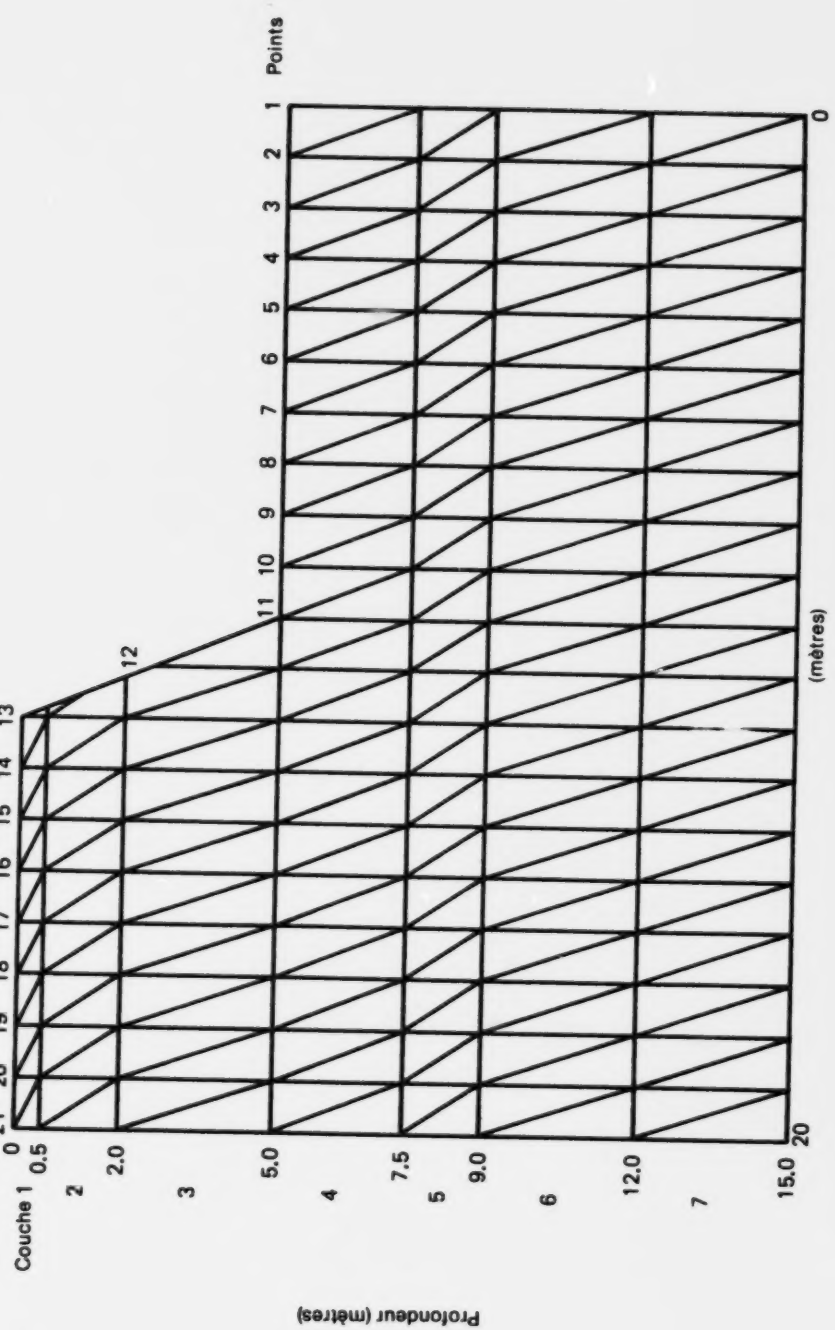
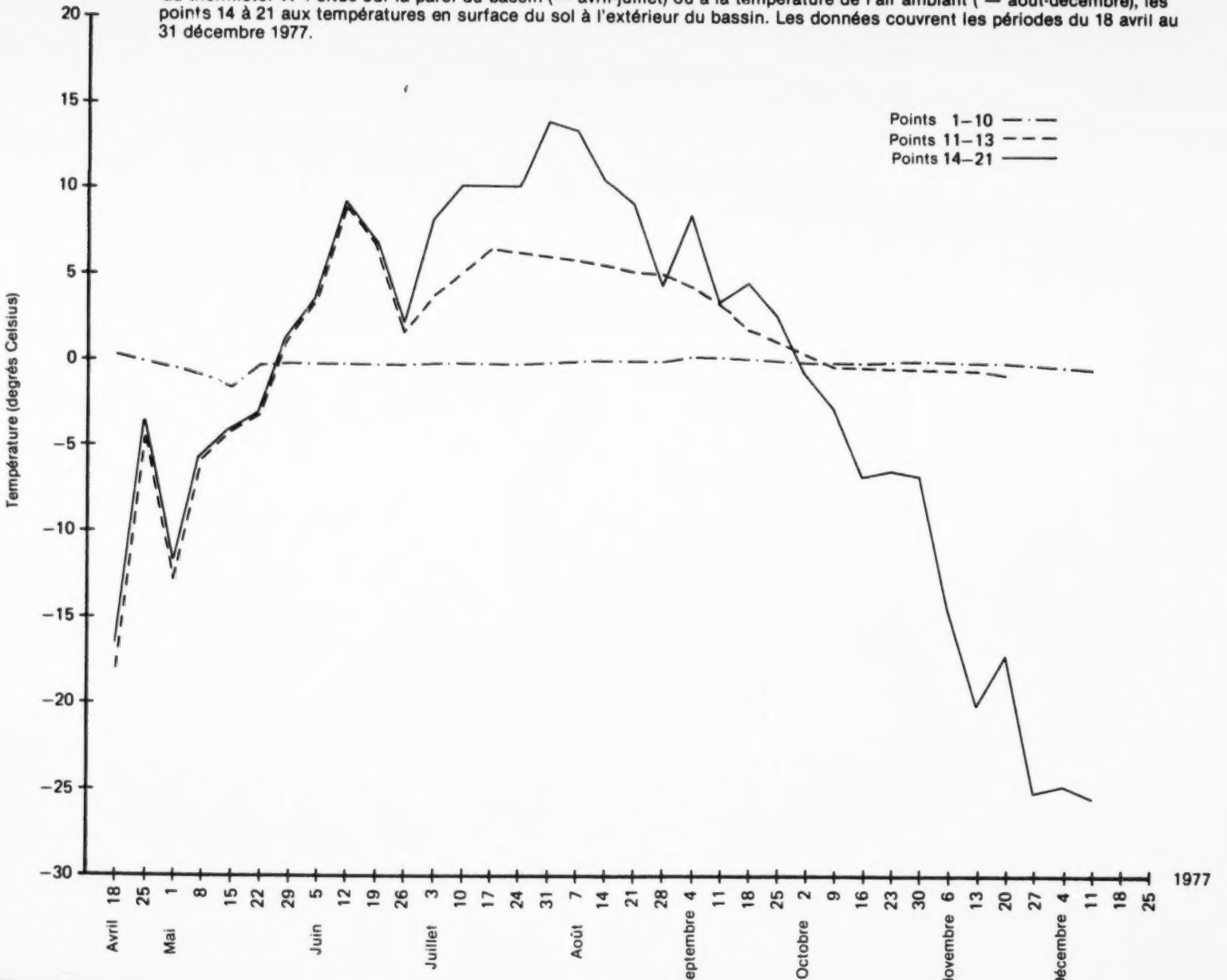


FIGURE 10. Données géométriques d'entrée et disposition des éléments finis pour le modèle informatique utilisé pendant l'étude.

FIGURE 11. Conditions limites de température en surface enregistrées au puits M-31 et utilisées pour les simulations thermiques de bassins. Les points 1 à 10 se rapportent au thermistor W-10 posé sur le fond du bassin, les points 11 à 13 au thermistor W-4 situé sur la paroi du bassin (≅ avril-juillet) ou à la température de l'air ambiant (≅ août-décembre), les points 14 à 21 aux températures en surface du sol à l'extérieur du bassin. Les données couvrent les périodes du 18 avril au 31 décembre 1977.



est utilisée (Hwang et al, 1972). Ce modèle a déjà donné des résultats satisfaisants pour la résolution d'un problème complexe de pergélisol (Smith et Hwang, 1973).

Une grille à éléments triangulaires permet de représenter toute figure géométrique arbitraire (figure 10). Aux fins de la modélisation numérique, les autres aspects essentiels de la situation réelle ont été représentés comme il suit:

(i) seulement la moitié du problème a été examinée, l'autre étant considérée comme une image retournée.

(ii) la stratigraphie a été représentée sous la forme du nombre de couches horizontales.

(iii) les propriétés thermiques au sol n'ont pas été mesurées directement, mais évaluées selon la composition granulométrique et la teneur en humidité, d'après la méthode de Johansen (1973). Les valeurs obtenues au puits M-31 apparaissent au tableau 1;

(iv) la surface du sol et le fond et les parois du bassin à boue ont été considérées comme des limites ayant les températures suivantes:

a) les points 1 à 10 (fond du bassin à boue) suivent une courbe de température semblable à celle du thermistor W-10 qui était installé sur le fond du bassin (figure 11);

b) les points 11 à 13 (parois du bassin) suivent la température des fluides (thermistor W-4) ou la température ambiante, selon le niveau des fluides dans le bassin (figure 11);

c) aux points 14 à 21 (surface du sol), la température varie selon le temps et la saison. Puisque l'on ne dispose que des températures de l'air (TA) de l'emplacement, les températures en surface (TS) ont été estimées à l'aide du modèle informatique décrit par Smith (1977). Ce modèle a servi à évaluer la différence entre les températures de l'air et du sol à différents moments de la période, les résultats généraux suivants ayant été obtenu:

Avril-Mai:	TS = TA + 1.5°C
Juin:	TS = TA + 2°C
Juillet:	TS = TA + 1.5°C
Août:	TS = TA + 1°C
Septembre:	TS = TA
Octobre:	TS = TA - 1°C

La courbe de température en surface, TS, apparaît également à la figure 11.

(v) Les températures de la limite inférieure ont été laissées identiques aux valeurs de la condition initiale (soit le champ thermique préalable à la perturbation mesuré avant le début des activités de forage). Les limites de gauche et de droite sont considérées comme étant thermiquement isolées, c.-à-d. sans aucun gradient horizontal de température et aucun flux de chaleur qui ne les traverse.

Les dimensions du problème déterminent la taille du domaine; le mode de résolution de la technique analytique dépend du degré de raffinement de la grille imposé à ce domaine, ce qui, dès lors, détermine les exigences informatiques du problème. Par souci d'efficacité, la grille a été raffinée dans les couches supérieures, où les gradients sont plus marqués (figure 10). De plus, le problème a été tronqué des côtés gauche et droit, où les observations sur le terrain ne présentaient aucun gradient horizontal de température significatif (voir (v) ci-dessus).

La simulation s'est déroulée par étapes hebdomadaires, et, dans le cas d'une grille de 21 x 9 (20 m sur 15 m), pendant une période de 38 semaines; le programme a utilisé 10 minutes du temps d'unité centrale de l'ordinateur Sigma 9 de Xerox de l'Université Carleton. Les diagrammes des températures observées et prédites par simulation ont été établis et tracés par ordinateur à l'aide du module SYMAP se trouvant à l'Université Carleton (figures 12 à 18).

Deux autres aspects du problème thermique ont été analysés à l'aide du modèle décrit par Smith (1977) et Smith et Tvede (1977). Ils se rapportent aux détails des températures des fluides en bassin pendant le regel et à l'efficacité des matériaux isolants des parois des bassins.

6. RESULTATS

6.1 Introduction

Les données géothermiques obtenues dans les deux emplacements ne peuvent être comparées directement, puisque les conditions et la nature des activités de forage qui s'y déroulent sont très différentes.

Les activités de forage du puits 1-01 n'ont duré qu'un seul hiver, tandis qu'elles se sont étendues sur deux hivers au puits M-31 (tableau 2). Un aperçu des incidences de ces différents échéanciers a déjà été présenté (French, 1978a, p. 37-38). Par essence, pendant une saison unique de forage, les boues gèlent rapidement dès leur entrée dans le bassin et

Couche	Intervalle (m)	Type de sol	Capacité thermique ($cal/cm^3/C$)		Conductivité thermique (cal/cm^3)		Chaleur latente volumétrique (cal/cm^3)
			F	U	F	U	
1	0.0-0.5	Gravier/ sable	.25	.30	.0034	.0034	15.8
2	0.5-2.0	Gravier/ sable	.26	.32	.0050	.0050	17.0
3	2.0-5.0	Gravier/ sable	.29	.34	.012	.0078	18.9
4	5.0-7.5	Sable graveleux	.30	.38	.013	.010	22.7
5	7.5-9.0	Surtout de la glace	.45	.90	.0059	.0016	63.6
6	9.0-12.0	Surtout de la glace	.45	.90	.0060	.0020	62.2
7	12.0-15.0	Gravier-sable-limon-argile	.46	.78	.0071	.0030	47.9

TABLEAU 1. Propriétés thermiques du sol, à l'emplacement du puits M-31, évaluées selon la granulométrie, la densité apparente et la teneur en humidité, d'après la méthode de Johansen (1973).

METHODES D'EXPLOITATION	NOMBRE DE PUITS VISITES	NOMBRE DE PUITS PRESENTANT DES PROBLEMES DUS AU BASSINS A BOUE ET(OU) A D'AUTRES CAUSES	EXEMPLES
1. Saison hivernale unique de forage (début et achèvement des travaux, y compris la remise en état de l'emplacement, pendant un seul hiver).	24	4	Hecla 1-69 Drake B-44 Bent Horn 1-01
2. Saison de forage de deux hivers (début et achèvement des forages en un seul hiver. Le bassin à boue a été laissé béant pendant l'été, et l'emplacement, remis en état pendant la deuxième hiver).	12	6	Parsons Lake N-10 Parsons Lake A-44 Chads Creek B-64 Hecla J-60
3A. Saison estivale de forage (les activités ont débuté en hiver et se sont poursuivies jusqu'en été. La remise en état de l'emplacement s'est déroulée pendant le deuxième hiver).	7	4	Taglu D-55 Bent Horn A-02
3B. Saison estivale de forare (les travaux ont commencé au milieu de l'été pour se terminer l'hiver suivant).	4	3	Drake D-68 Niglintgak M-19

TABLEAU 2. Classification des emplacements des puits d'exploration examinés en 1976 et 1977, d'après les méthodes d'exploitation, et actuels problèmes dus aux bassins à boue et(ou) à d'autres causes.

	PROBLEMES	EXEMPLES	COMMENTAIRES
A.	Problèmes de non-endiguement pendant les activités de forage	Bent Horn 1-01 Chads Creek B-64 Parsons Lake N-10	Deux bassins ont été construits.
B.	Problèmes de fonte pendant les activités estivales de forage.	Bent Horn A-02 Parsons Lake D-20 Parsons Lake A-44	Sapement de la plate-forme de forage. Fuite des fluides Thermokarst/agrandissement du bassin à boue.
C.	Problèmes de remise en état:		
	a) remblayage du bassin à boue et effet de volcan	Parsons Lake 1-44	Un vaste dôme de gravier a été construit.
	b) affaissement et effondrement du bassin à boue	Drake D-68; Beaverhouse Creek N-13	
	c) Manque de terre de remblayage	Niglintgak M-19; H-30; Taglu D-55	
	d) fuite des fluides	Parsons Lake D-20	
	e) emplacements géographiques mal choisis	Drake B-44; Castel Bay C-68; Hecla J-60; Kumac J-06	
	f) graves perturbations du terrain	Bent Horn A-02; Orksut 1-44	

TABLEAU 3: Analyse des problèmes posés par les bassins à boue et exemples décrits dans le texte.

le remblayage se fait avant qu'ils ne dégèlent en été. Les problèmes des bassins de tels emplacements sont habituellement de type A et quelquefois de type C (tableau 3). Dans le cas du puits 1-01, la compagnie a rencontré des problèmes de type A (French, 1978a, p. 19-20); le bassin à boue était trop petit pour contenir tous les fluides résiduels, et un autre bassin a dû être construit. A intervalles réguliers pendant les dernières phases des opérations, les fluides gelés ont dû être retirés du bassin principal et transportés au bassin auxiliaire. Il n'est donc pas surprenant que le câble à eau W et plusieurs autres câbles aient été endommagés au puits 1-01 pendant l'exploitation du bassin à boue.

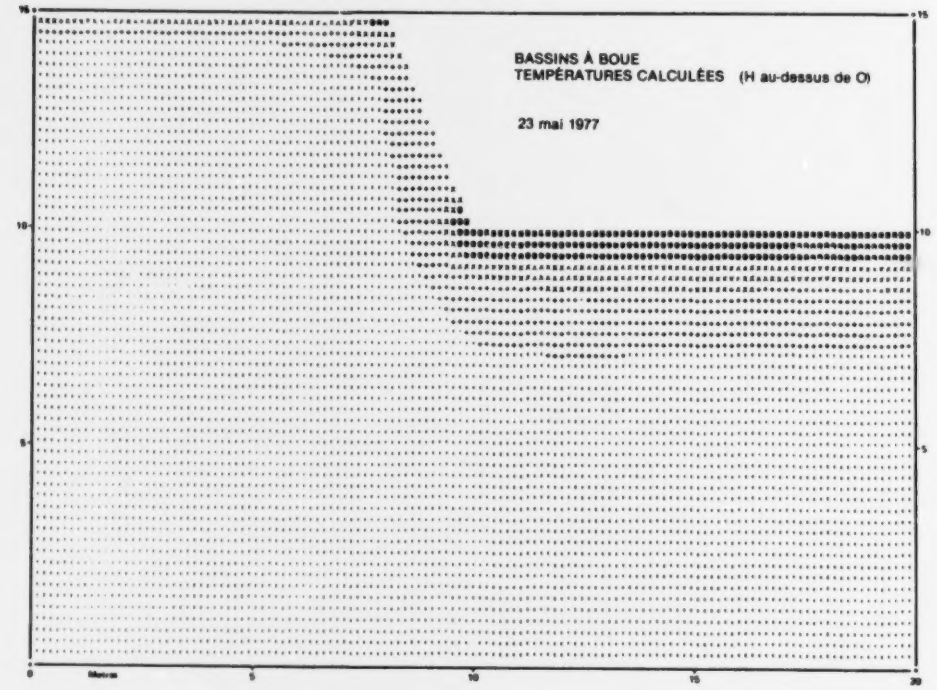
Les opérations de forage durant deux hivers posent habituellement davantage de problèmes, puisque les fluides du bassin à boue dégèlent en été lorsque celui-ci reste béant, et des problèmes de type B (fonte de la glace des parois du bassin) peuvent se produire. De plus, les problèmes de remblayage et de remise en état de l'emplacement (type C) y sont plus répandus, les fluides pouvant ne pas regeler l'hiver suivant. Les problèmes rencontrés au puits M-31 concernent le remblayage du bassin.

La nature de la remise en état de l'emplacement est décrite à la section 6.5.

Les conditions propres à l'emplacement désignent les caractéristiques du pergélisol des deux emplacements. Même s'ils sont tous deux situés dans la zone de pergélisol continu, l'épaisseur de celui-ci est de 720 mètres au puits Bent Horn N-72 et de 325 mètres au puits Ikhil 1-37 dans les monts Caribou (Brown, 1978; Taylor et Judge, 1977). De plus, les températures annuelles moyennes à la surface du sol sont très différentes. Elles reflètent des différences de géologie et de stratigraphie du pergélisol entraînant des propriétés thermiques terrestres différentes de même que des variations latitudinales et climatiques. Ainsi, les températures du pergélisol non perturbé au puits 1-01 sont considérablement plus basses qu'au puits M-31 (voir sections 4.1 et 4.2). Ces facteurs, lorsqu'ils sont combinés à la température et à la composition chimique variables des fluides résiduels de forage pénétrant dans les bassins à boue indiquent que la comparaison directe des changements géothermiques enregistrés n'est pas utile. D'autre part, les perturbations subies par les bassins à boue et la structure générale des changements géothermiques devraient présenter des relations générales similaires.

6.2 Exactitude des prévisions

Des données plus complètes ont été obtenues au puits Ogruknang M-31 du 6 avril 1977 à août 1978. Les dommages subis par les instruments au puits 1-01 limitent l'utilité de ce dernier.



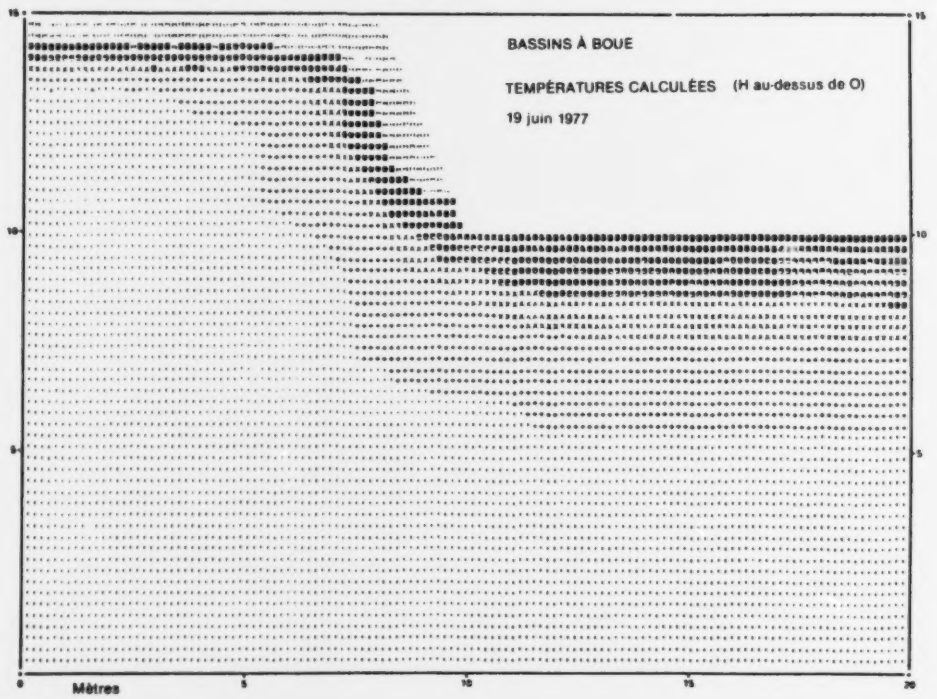
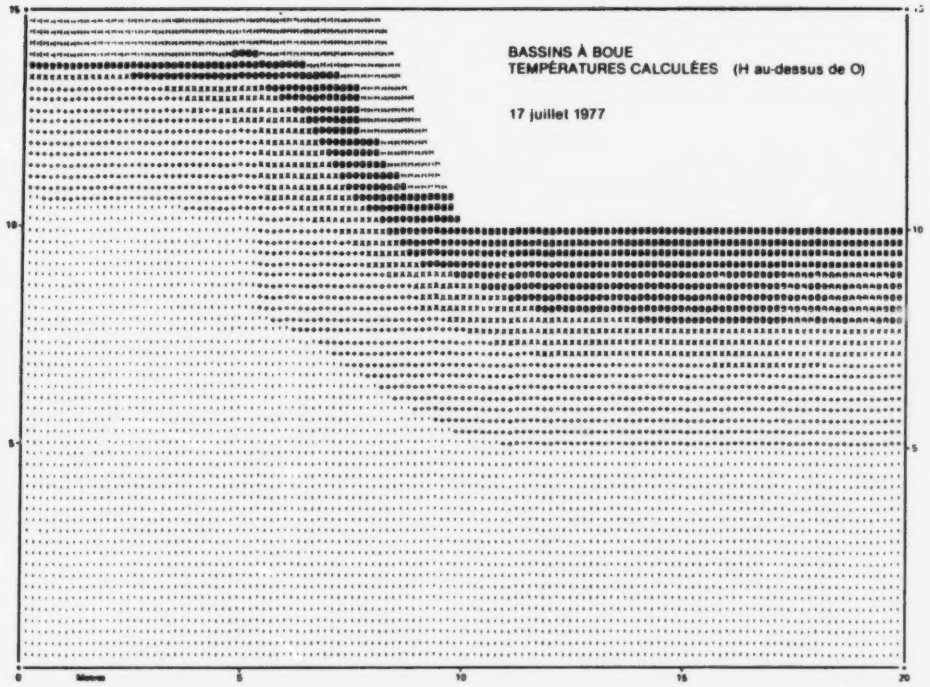


FIGURE 12. Conditions thermiques, telles que prédites à partir des données observées, bassin à boue du puits M-31, 23 mai 1977 et 19 juin 1977.



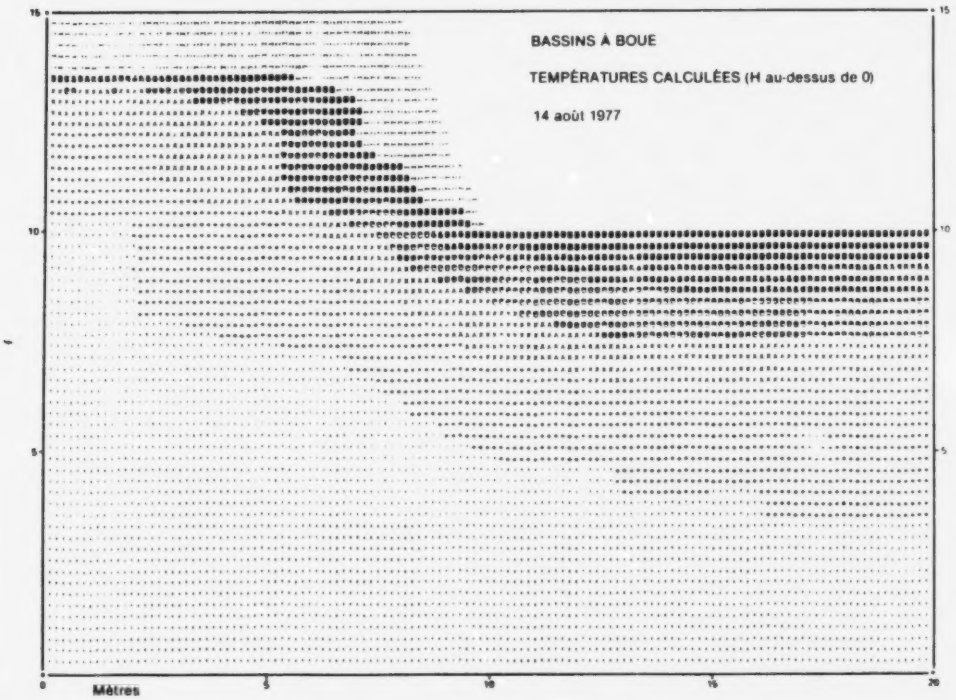
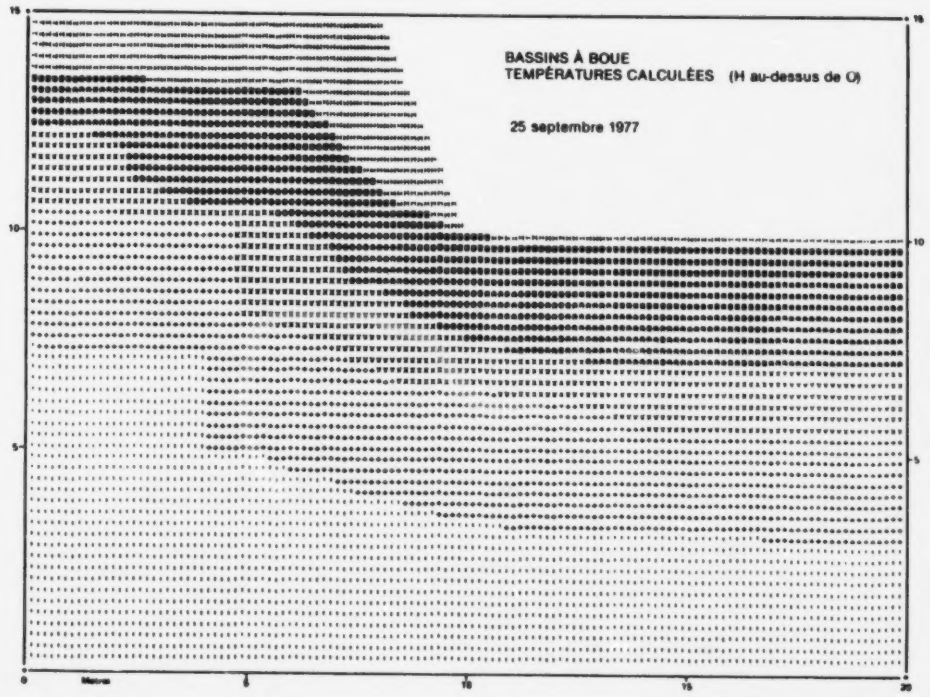


FIGURE 13. Conditions thermiques, telles que prédites à partir des données observées, bassin à boue du puits M-31, 17 juillet et 14 août 1977.



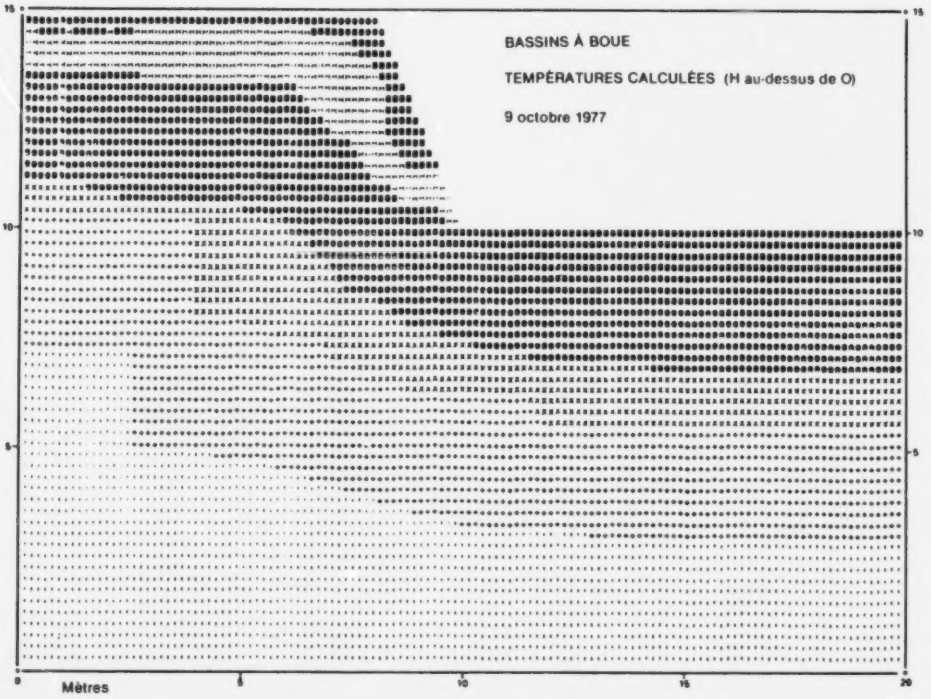
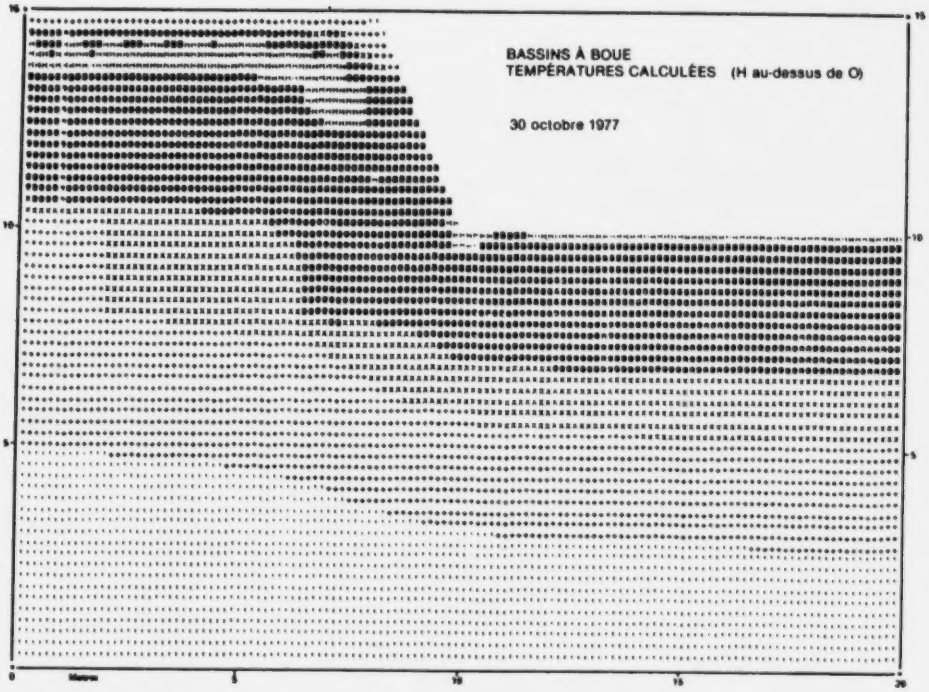


FIGURE 14. Conditions thermiques, telles que prédites à partir des données observées, bassin à boue du puits M-31, 25 septembre et 9 octobre 1977.



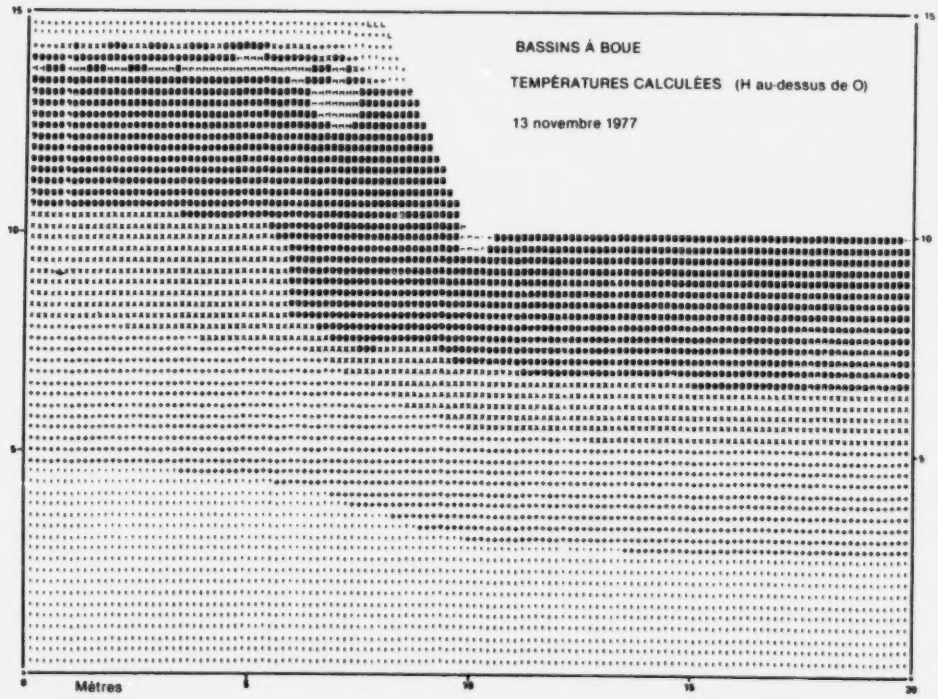


FIGURE 15. Conditions thermiques, telles que prédites à partir des données observées, bassin à boue du puits M-31, 30 octobre et 13 novembre 1977.

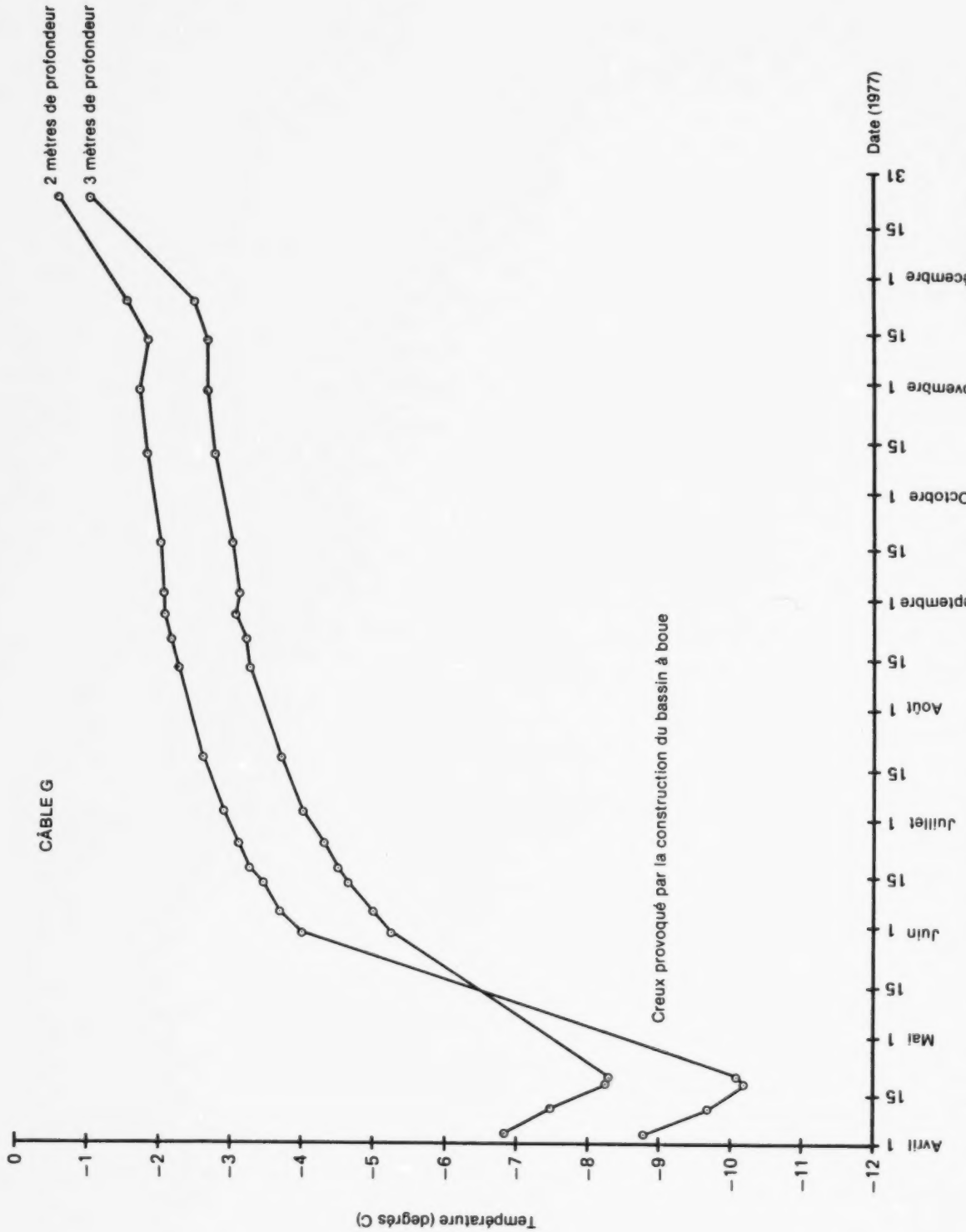


FIGURE 16. Températures du sol sous le fond du bassin à boue du puits M-31, telles qu'illustrées par les données obtenues avec le câble G (voir figure 9 pour l'emplacement de ce câble) du 4 avril au 31 décembre 1977.

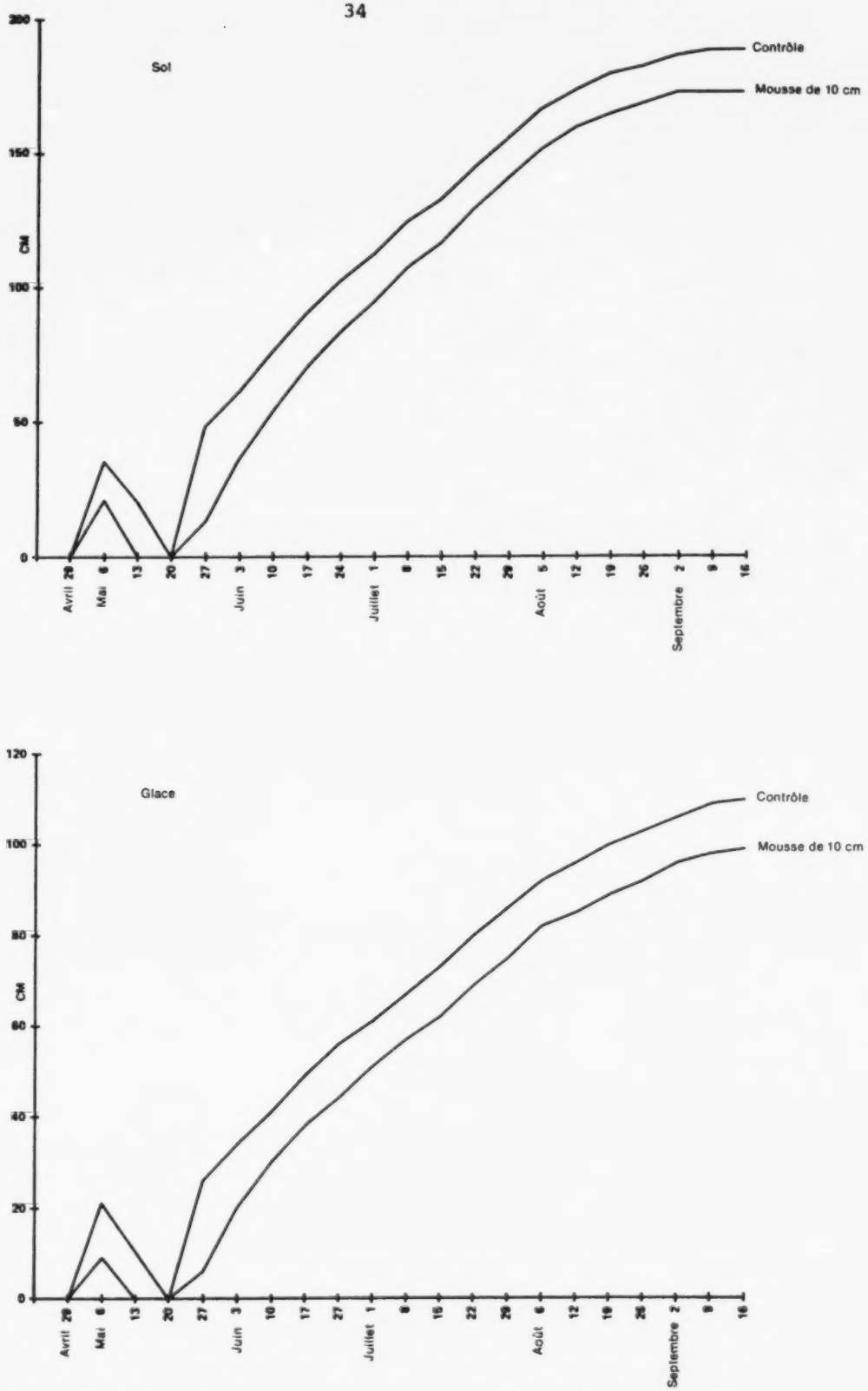


FIGURE 17. Simulation des effets d'une mousse isolante d'uréthane de 10 cm d'épaisseur sur le dégel a) d'un sol minéral et b) de la glace.

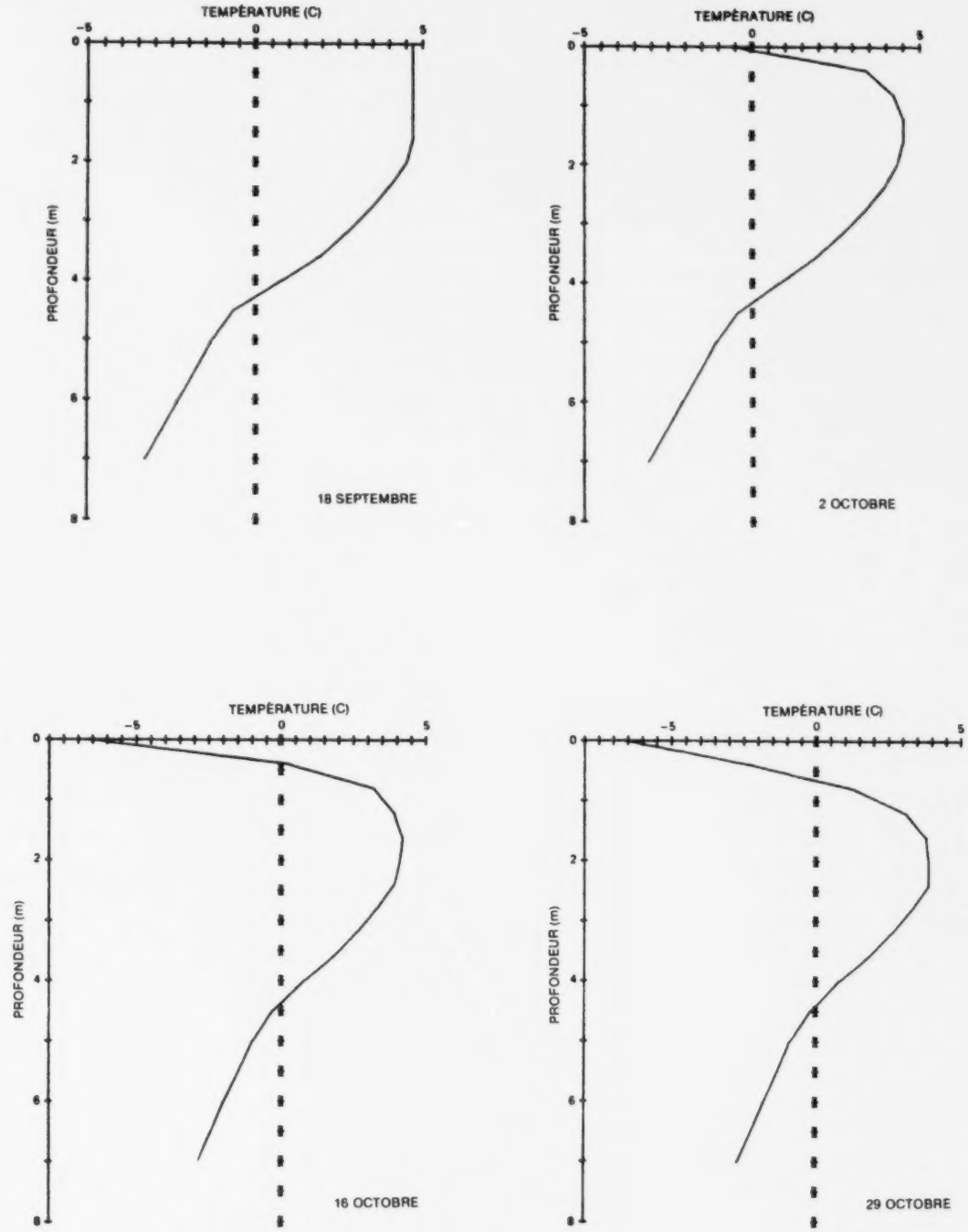


FIGURE 18. Température des fluides du bassin à boue, du puits M-31, du 18 septembre au 29 octobre 1977.

Les configurations prévues des températurese au sol autour du bassin à boue du puits M-31 du 23 mai au 13 novembre 1977 apparaissent aux figures 12 à 18. Ces graphiques proviennent d'une simulation par ordinateur basée sur des données observées. Il est à noter que les épaulements abrupts de certains isothermes proviennent de l'interpolation numérique et de la grosseur de l'équidistance (jusqu'à 5°C dans certains cas). Les températures d'environ 0°C sont indiquées par le symbole "H". Les températures inférieures à zéro ont arbitrairement été divisées en huit classes.

Les données présentées à l'annexe 1 (câble G, fond du bassin et câble K, extérieur du bassin) sont un exemple typique de l'exactitude des prévisions. Les valeurs observées concordent nettement avec les valeurs prédites; l'erreur maximale est d'environ 1°C, mais le degré caractéristique de concordance est à ±0.5°C. Les valeurs beaucoup plus chaudes prédites dans les couches médianes au câble G sont indiscutablement dues à des erreurs de spécification des propriétés thermiques du sol; les conductivités sont vraisemblablement trop élevées. Une autre erreur du modèle peut être la supposée absence d'eau non gelée dans les matériaux gelés. Dans le cas du câble K, la concordance est excellente et le changement graduel de la forme du géoisotherme pendant la période est très bien reproduit (p. ex., comparez les géoisothermes B, H et N). L'évolution prévue du mollisol à l'emplacement du câble K est presque exacte (voir les géoisothermes E à L); la profondeur maximale d'environ 1.7 m le 28 août est reproduite avec précision et la prévision du regel est également excellente (voir les géoisothermes K à O).

6.3 Ogruknang M-31

6.3.1 Changements géothermiques

L'effet thermique du bassin à boue s'étendant graduellement dans le pergélisol environnant pendant l'été de 1977 apparaît aux figures 12 à 18, qui couvrent également la période de regel. Les données de température enregistrées sur le terrain sont conservées à la Division des études environnementales, MAIN, Ottawa.

La conclusion la plus importante à tirer du programme de surveillance de la température est que la zone degelée associée au bassin à boue se limite surtout aux parois du bassin, presque aucun dégel n'ayant été observé dans le fond de celui-ci. Les températures du fond du bassin ont toutefois été considérablement modifiées par l'arrivée des fluides résiduels de forage. Le 11 avril 1977, les températures du fond du bassin, qui allaient de -15 à 20°C, se sont réchauffées très rapidement pendant les trois premières semaines de forage et ont oscillé autour de 0°C pendant le reste de la période de forage. Le

2 septembre 1977, après l'arrêt des travaux, les températures sont montées jusqu'à +0.5°C. Le pergélisol sous le fond du bassin s'est également réchauffé rapidement au début (passant de -13 à -4°C à une profondeur de 0.5 m entre le 4 avril et le 24 avril 1977), mais plus lentement par la suite jusqu'à environ -0.5°C le 16 septembre 1977 (figure 16). Les données montrent clairement que le fond du bassin à boue n'a pas dégelé pendant l'été de 1977 et que la masse volumineuse de glace située sous celui-ci (voir figure 8) est aussi restée gelée. Le cas du puits m-31 étant un exemple d'exploitation où le pire aurait pu se produire, le programme de surveillance thermique concorde avec l'affirmation que la dégradation thermique estivale sous un bassin à boue béant n'est pas étendue.

D'autre part, il faut insister sur l'effet important de réchauffement des fluides résiduels de forage sur le pergélisol. Ainsi, le 11 septembre, les températures du sol au câble I, le plus rapproché de la paroi du bassin, étaient plus chaudes de plusieurs degrés qu'à une profondeur comparable du câble N, plus éloigné de la paroi et installé à titre de câble témoin. Les températures maximales des fluides enregistrées à l'été 1977 allaient de +5 à +8°C; toutefois, en octobre, elles étaient descendues à -1°C (voir figure 21). La figure 19 montre que l'effet de réchauffement de ces fluides se fait sentir jusqu'à 3 m sous le fond du bassin, mais la surveillance thermique révèle également que les températures n'étaient pas modifiées à une profondeur de 10 m. Les données recueillies en été 1978, soit un an après l'arrêt des activités, révèlent que les températures à une profondeur de 2 m sous le fond du bassin avaient atteint un quasi-équilibre de -1.4°C, soit plusieurs degrés de plus que le pergélisor non perturbé entourant le site.

Le dégel maximal du pergélisol sous le bassin du puits M-31 a été observé à la fin d'août 1977 (figure 15), après quoi il y eut peu de changements jusqu'au regel au début d'octobre. Les figures 17 et 18 montrent le regel de la surface et du fond du mollisol, processus virtuellement terminé à la mi-novembre. Des phénomènes similaires ont été observés ailleurs dans le delta du Mackenzie (p. ex., Heginbottom, 1973).

Les parois du bassin à boue ont regelé au début d'octobre, comme l'illustre la figure 17. Les changements thermiques précis se produisant dans la paroi sont cependant mal connus, puisque cette prévision est basée sur une température des fluides de -0.5°C mesurée à mi-chemin de la paroi. A cette époque, le câble mesurant la température des fluides (W) enregistrait des variations

considérables (+1.5 à -1.5°C). Les forages s'étant terminés en août et aucun fluide n'étant censé avoir été déversé dans le bassin, il faut se demander si ces variations sont réelles ou traduisent une erreur.

En résumé, les seuls problèmes importants de dégel associés au bassin à boue du puits M-31 se sont produits dans les parois, probablement par suite du rayonnement solaire direct et réfléchi. A la fin d'août 1977, un dégel vertical maximal d'environ 2 m et un dégel latéral maximal de même distance avaient été observés. Si les matériaux constituant les parois du bassin avaient été riches en glace ou avaient exposé des fentes de glace prononcées, il aurait pu se produire une fonte et un ravinement semblable à celui observé l'été précédent au bassin à boue des puits Bent Horn A-02 et de Parsons Lake A-44 (French, 1978a, p. 27-28).

6.3.2 Utilisation d'une couche isolante

Une couche isolante d'uréthane a déjà servi en divers endroits à protéger les parois de bassins à boue contre le dégel, mais l'efficacité de cette méthode est mal connue. Elle a été étudiée par simulation informatique. Un passage-machine de contrôle, avec la situation naturelle, a prédit un dégel de 1,9 m dans les parois (valeur concordant très bien avec celle déduite des observations de la température au puits M-31 - voir ci- dessus section 6.3.1). Une deuxième simulation a été effectuée avec une couche isolante d'uréthane de 10 cm en surface; le dégel prédit était d'environ 1,7 m (figure 20), réduction d'environ 10% seulement. On peut donc déduire que l'utilisation d'un tapis isolant sur les parois d'un bassin et d'une digue n'est pas une mesure très efficace.

Cette conclusion semble être corroborée par certains rapports de campagne, notamment ceux relatifs au delta du Mackenzie.

6.3.3 Regel des fluides en bassin à boue

La nature et la vitesse du regel des fluides en bassin à boue sont particulièrement préoccupantes, puisque les bassins sont utilisés justement pour que les fluides résiduels de forage gèlent in situ dans le pergélisol environnant. Cette méthode permet de les endiguer d'une façon permanente et de minimiser les effets toxiques, s'il en est. Toutefois, dans certains cas, notamment dans les localités où le bassin reste béant pendant l'été, il a été prouvé que les fluides résiduels ne sont pas complètement gelés au moment du ramblayage. Le poids de la couverture a souvent provoqué l'effondrement de la surface gelée du

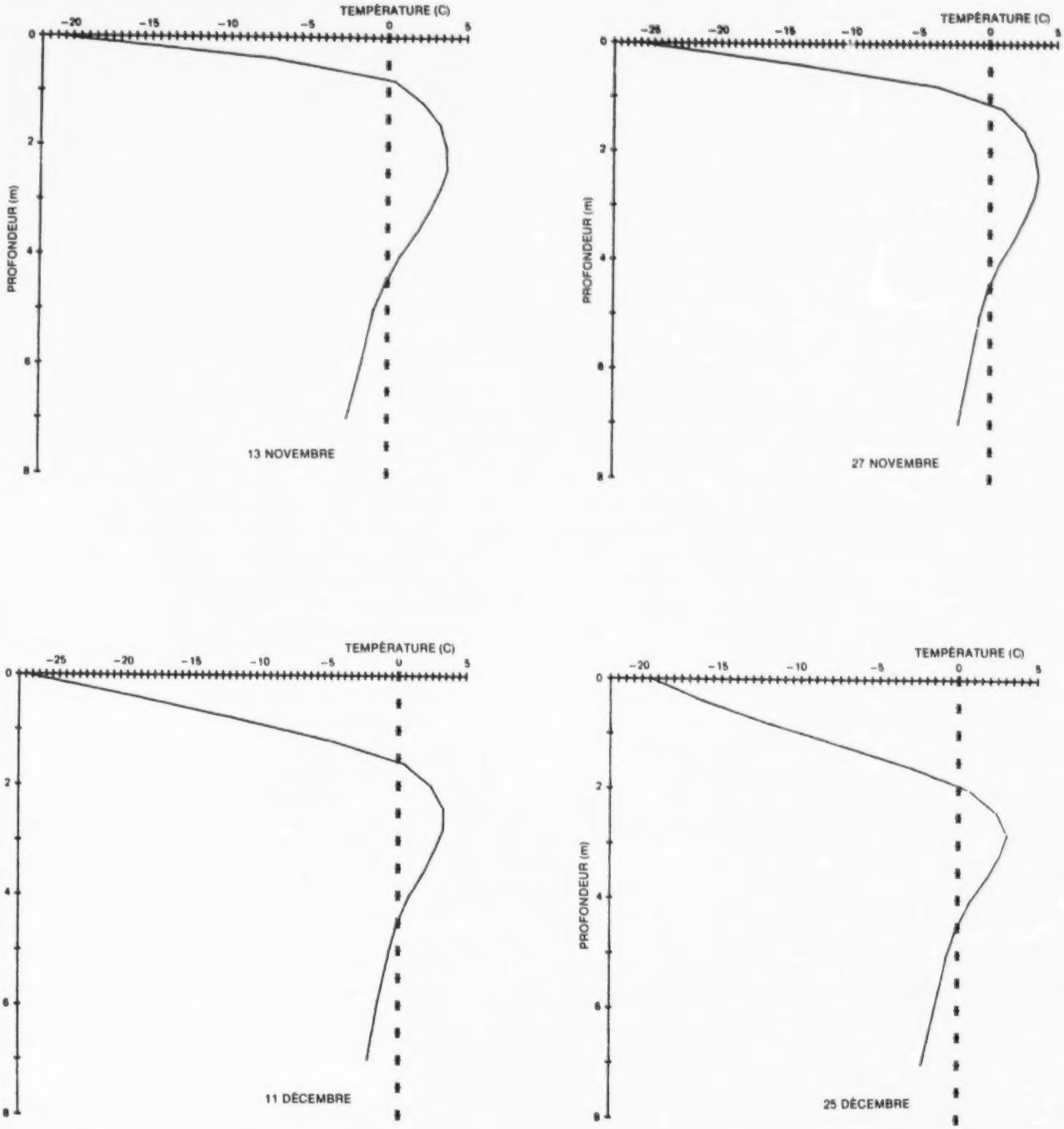


FIGURE 19. Températures des fluides du bassin du puits M-31, du 13 novembre au 25 décembre 1977.

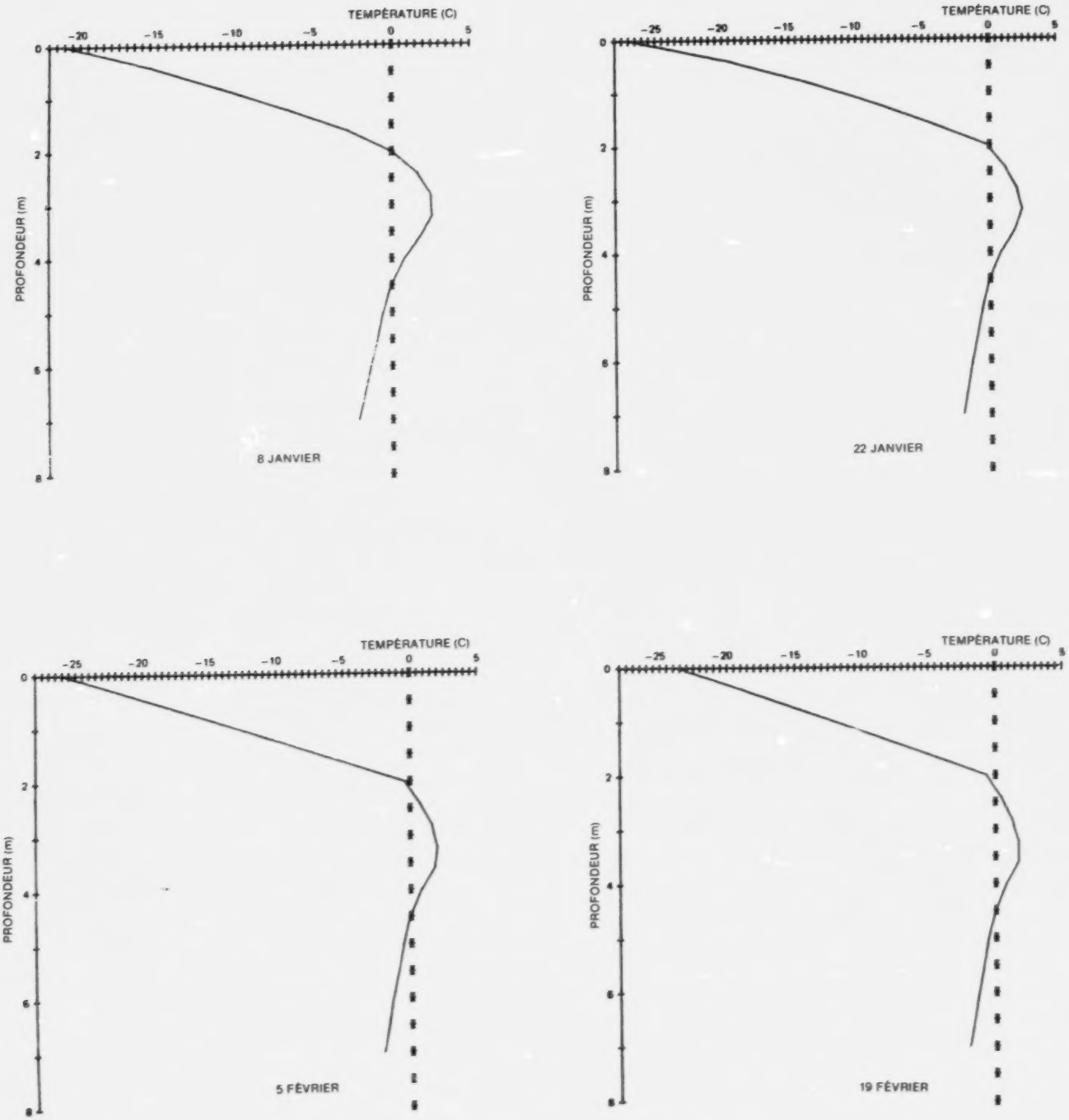


FIGURE 20. Températures des fluides du bassin à boue du puits M-31, du 8 janvier au 19 février 1978. Les travaux de remblayage du bassin ont débuté le 20 février 1978 (voir figures 21C et 21D).

bassin et la remontée des fluides en surface (effet de volcan). La teneur en sel des fluides résiduels, qui abaisse le point de congélation, peut expliquer en partie le problème. Un des objectifs du programme de surveillance thermique était d'obtenir des renseignements sur la vitesse de regel des fluides en bassin à boue.

Les fluides du bassin à boue du puits M-31 ont dégelé complètement pendant l'été de 1977 et des températures aussi élevées que +8°C ont été enregistrées au début d'août. Dès le début d'octobre, par suite de la baisse des températures de l'air, les températures superficielles des fluides sont tombées à -1°C et, selon toute probabilité, la surface a commencé à regeler à cette époque ou immédiatement après.

Les températures des fluides enregistrées pendant la période s'étendant de septembre 1977 à février 1978, époque où le bassin était rempli, sont présentées aux figures 21, 22 et 23. Les données révèlent que seule la température des deux premiers mètres de fluide était inférieure à 0°C à la mi-février. En supposant que le gel se produise à 0°C, un maximum de deux mètres de glace s'était formé dans le bassin à cette époque et sa section profonde était dégelée. Comme on pouvait s'y attendre, le bassin "s'est rompu" pendant son remblayage et les fluides résiduels de forage dégelés sont remontés en surface (voir section 6.5).

Le programme de surveillance n'a pas duré assez longtemps pour déterminer avec certitude la vitesse du regel éventuel de ces fluides. De plus, les analyses chimiques qui étaient nécessaires pour déterminer le point de congélation n'ont pas été effectuées dans le cadre de la présente étude. Il semble toutefois évident que si les boues du bassin dégèlent, comme dans le cas d'activités de forage de deux hivers, elles ne regèleront pas plus profondément ou plus rapidement que les masses d'eau naturelles adjacentes. Dans le delta du Mackenzie, il est prouvé que les masses d'eau de plus de 2-3 mètres de profondeur, ne gèlent pas jusqu'au fond en hiver et peuvent, en réalité, favoriser la formation de zones importantes de dégel ou taliks (p. ex., Johnston et Brown, 1965; Smith et Hwang, 1973).

Au puits M-31, plusieurs facteurs donnent à penser que les fluides du bassin finiront par geler plutôt que par favoriser une dégradation thermique. Le premier est qu'à la fin d'août 1978, les températures du sol situé immédiatement sous le bassin avaient atteint un quasi-équilibre de -1.4°C. Aucune hausse estivale des températures liée au dégel des fluides n'a été constatée

à cette profondeur. Le deuxième est que les fluides du bassin se sont incorporés à la couverture gelée au moment du remblayage en février 1978 et que tout effet thermique associé à des fluides non gelés aurait été dissipé. Il s'ensuit qu'il faudrait considérer la construction de bassins peu profonds dans les localités où les fluides pourraient dégeler, ce qui leur permettrait de geler plus solidement pendant l'hiver suivant.

6.4 Bent Horn 1-01

6.4.1 Introduction

Le bassin à boue de ce puits ayant été le premier à être muni d'instruments, il s'est posé certains problèmes qui rendent les résultats moins complets que prévu. Une analyse révèle clairement que, même si trop d'instruments ont été installés en novembre 1976, certaines des données pouvant s'avérer les plus utiles se sont perdues au début en raison de difficultés techniques, dont la perte des câbles pour mesurer les températures des fluides et du fond du bassin. D'autres câbles ont par la suite été endommagés pendant les activités de forage, probablement lors du retrait périodique des fluides gelés et également au moment du remblayage du bassin en mai 1977. En août 1978, il ne restait que 5 câbles utilisables (figure 21A).

6.4.2 Changements géothermiques

Les données recueillies à l'emplacement du puits 1-01 confirment les tendances générales observées d'une façon plus systématique à l'emplacement du puits M-31. Une différence majeure réside cependant dans le fait que le puits 1-01 a été foré pendant un seul hiver. Il en résulte que les effets géothermiques des bassins exploités en hiver dans l'Arctique supérieur n'entraîneront pas la fonte du pergélisol, puisque les fluides gèlent presque instantanément.

Les températures du pergélisol superficiel non perturbé dans la région de Bent Horn varient de -15 à -20°C. Ces valeurs sont basées sur les températures enregistrées à l'emplacement du puits adjacent Bent Horn N-72 (Taylor et Judge, 1977). Au puits 1-01, les premiers relevés de température ont été effectués le 19 décembre 1976, environ une semaine après le début des travaux de forage. A cette époque, le fond du bassin à boue avait déjà atteint -10.6°C. Peu après, le câble a été endommagé. Le personnel a tenté de le réparer, mais sans succès, en raison des conditions météorologiques

FIGURE 21 A. Puits Bent Horn 1-01, 21 août 1978. Vue aérienne oblique de l'emplacement remis en état. Remarquez que la torchère béante s'est emplie d'eau, mais que le terrain recouvrant le bassin à boue n'a pas glissé.

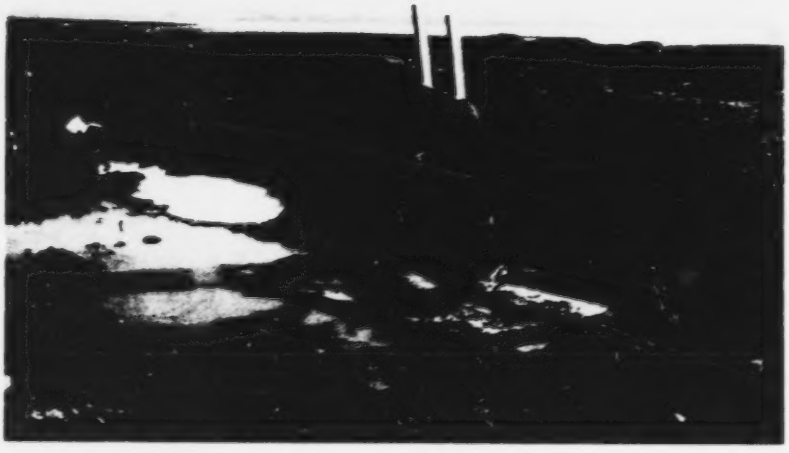


FIGURE 21 B. Emplacement du puits Bent Horn 1-01, 21 août 1978. Restes du tableau de contrôle et des câbles à thermistors; seulement 5 des 13 câbles fonctionnaient encore. La surface du bassin à boue était sèche et compactée.

FIGURE 21 C. Emplacement du puits Ogruknang M-31, 2 mars 1978. Vue du bassin à boue au début de son remblayage. Les matériaux se trouvant à l'arrière-plan sont poussés dans le bassin. Remarquez la neige dans le bassin.

FIGURE 21 D.
Emplacement du puits Ogruknang M-31, 10 mars 1978. Vue du bassin à boue à demi remblayé. Le poids de la couverture provoque la remontée des fluides du bassin non gelés et le craquement de la surface gelée du bassin. Peu après, la surface du bassin à boue "s'est rompue". (Voir figure 3 C pour une photographie de l'emplacement remis en état, 4 août 1978).

hivernales. Les données suivantes ont été obtenues le 5 mai 1977, alors qu'il a été possible d'effectuer les réparations. A cette date, le fond du bassin avait atteint une température de -9,1°C et les fluides eux-mêmes -8,8°C. On peut supposer sans crainte que les fluides du bassin sont restés gelés pendant toute cette période. De plus, comme le remblayage a eu lieu peu après, il n'y a guère de possibilités que les fluides aient dégelé avant d'être enfouis. Malheureusement, les câbles ont de nouveau été endommagés au moment du remblayage. Nous ne disposons donc d'aucune autre donnée sur la température à l'appui de la conclusion que les fluides sont restés gelés, mais des visites sur le terrain en août 1977 et 1978 n'ont permis de déceler aucun signe de dégel et d'affaissement du bassin.

A l'emplacement du puits M-31, l'effet considérable de réchauffement des fluides du bassin à boue sur le pergélisol environnant doit être souligné. Ainsi, la température, à une profondeur de 0,25 m sous le fond du bassin, était de 10 à 12°C plus chaude au câble B qu'au câble G au début de mai 1977. Cet effet de réchauffement est disparu à une profondeur de 5 m sous le bassin, confirmant ainsi les données sur la pénétration du dégel sous le fond du bassin obtenues au puits M-31.

Le peu de données thermiques obtenues à l'emplacement du puits 1-01 ne permettent pas d'interpréter les modifications géothermiques ou les prévisions informatiques obtenues, comme dans le cas du puits M-31.

6.5 Problèmes de remise en état des emplacements Bent Horn 1-01 et Ogruknang M-31

Des problèmes de remise en état de différents types ont été rencontrés à chaque puits.

Au puits Bent Horn 1-01, les problèmes rencontrés étaient la capacité insuffisante du bassin à boue et la nécessité d'en construire un autre durant les activités de forage. Au moment du remblayage du bassin principal en mai 1977, il était comble. De plus, des blocs gelés de fluides résiduels de forage étaient éparpillés autour de bassin à la suite de l'enlèvement périodique des fluides gelés pour les transporter vers le bassin auxiliaire situé à 0,4 km de là pendant les derniers stades du forage. Ils se sont trouvés inévitablement mêlés aux matériaux de couverture durant le remblayage. En août 1977, la surface du bassin à boue était gorgée d'eau, et l'on pouvait voir en surface des fluides résiduels mélangés à la couverture (Voir French 1978a, figure 7a). Toutefois, en août 1978, le bassin avait été si bien compacté que l'excès d'eau avait été

drainé ou s'était évaporé (figure 24b). On ne pouvait voir aucun signe de dégel ou d'affaissement du bassin, et il est très probable que les fluides y sont restés gelés.

Les problèmes de remise en état de l'emplacement du puits M-31 étaient tous associés au remplissage du bassin. Le poids de la couverture faisait fissurer la surface gelée du bassin (figures 21C et 21D) et remonter les fluides non gelés en surface. Ces fluides ont fini par être endigués, grâce à l'empiétement progressif du gravier placé tout autout du bassin (voir figure 3C). Même s'il reste encore une certaine quantité de fluides à la surface du sol (c.-à-d. dans le recouvrement de gravier), ils finiront probablement par geler. En été 1979, l'inspection de l'emplacement devait commencer pour y détecter les fuites possibles.

7. RESUME

7.1 Perturbations géothermiques dans les bassins à boue

Les conclusions suivantes sont tirées de l'étude:

1) L'utilisation de bassins à boue pour recueillir les fluides résiduels de forage aux deux puits surveillés n'entraîne pas une dégradation importante du pergélisol sous les bassins.

2) L'entrée des fluides résiduels de forage dans les bassins cause un réchauffement important des 1 ou 2 premiers mètres du pergélisol situé sous le fond du bassin. Les hausses de température peuvent être de l'ordre de 5 à 10°C. A des profondeurs de 5 à 10 m sous le fond des bassins, les effets de réchauffement disparaissent.

3) Pendant une saison hivernale de forage (Bent Horn I-01), les températures du pergélisol à une profondeur de 0,25 m sous le fond d'un bassin à boue sont passées de -15 et -20°C avant le début des travaux à -9°C pendant le forage. La température des fluides gelés du bassin à la fin des activités était de -8°C. Le bassin ayant été rempli avant le dégel estival, il est raisonnable de supposer que les fluides sont restés gelés.

4) Pendant les opérations de forage de deux hivers ayant permis aux fluides d'un bassin à boue de dégeler pendant l'été (Ogruknang M-31), les conditions géothermiques suivantes ont été observées:

   a) Pendant les trois premières semaines des travaux, les températures à une profondeur de 1 m sous le fond du bassin sont passées de 3-4 à -4°C, pour ensuite atteindre lentement un quasi-équilibre d'entre -1 et -2°C pendant les douze mois suivants.

b) A la fin de l'été, les températures au fond du bassin se sont élevées à +0,5°C.

c) La profondeur de dégel du fond du bassin a été minime en été, mais de 2 m dans les parois.

d) Les fluides du bassin n'étaient pas complètement gelés au moment de son remblayage en février de l'année suivante et ont posé des problèmes de remise en état.

5) Dans les régions où les températures du pergélisol sont plus élevées, les perturbations géothermiques engendrées par l'afflux des fluides en bassin à boue peuvent être suffisantes pour provoquer une dégradation thermique du fond des bassins.

6) Dans les régions où les températures estivales moyennes de l'air sont plus élevées, la présence d'un bassin béant, conjuguée probablement à des températures plus chaudes du pergélisol et à des quantités supérieures de glace dans le sol, peuvent mener à de sérieux problèmes de fonte, qui n'ont pas été rencontrés dans la présente étude.

7) Il est possible d'effectuer une simulation numérique précise des perturbations géothermiques dues aux bassins à boue avec des données sur les températures de l'air, les températures moyennes à la surface du sol et les évaluations des propriétés thermiques du sol. Les écarts de température des fluides pénétrant dans le bassin et la température à laquelle ils gèlent déterminent également la direction et le taux de changement géothermique.

7.2. Incidences sur le Règlement sur l'utilisation des terres arctiques

Les recommandatioans suivantes ne se rapportent qu'aux terrains et aux aspects géothermiques des bassins construits dans le pergélisol:

1) Les principaux problèmes topographiques causés par les bassins à boue dans les régions à pergélisol relativement froid, comme celui des deux emplacements surveillés, semblent reliés non pas aux perturbations géothermiques provoquant le non-gel des fluides du bassin et (ou) la fusion de la glace des parois, mais aux méthodes et techniques de remise en état.

2) Près de toute plate-forme de forage en exploitation, il devrait y avoir une torchère, un puisard domestique et un bassin pour les fluides résiduels de forage. Ceux-ci devraient tous être le plus petit possible pour minimiser les perturbations du sol, notamment si les sédiments sous-jacents sont propices à la formation de thermokarst et au ravinement. Il faudrait, dans la mesure du possible, empêcher la destruction du tapis organique superficiel.

3) Une méthode permettant d'avoir un petit bassin à boue est de laisser décanter les fluides pendant les travaux de forage. Si les fluides ne son pas toxiques ou peuvent être traités (p. ex., par filtration au charbon de bois), il est possible de les éliminer directement dans un plan d'eau ou sur la terre ferme. Il est reconnu que le traitement et l'élimination des fluides pendant des activités hivernales de forage sont souvent impossibles dans l'Arctique parce que les fluides en bassin gèlent et que cette méthode semble mieux appropriée aux opérations estivales.

4) Si les fluides en bassin sont toxiques et impossibles à traiter, il est recommandé de les endiguer en utilisant un bassin assez grand pour contenir tous les fluides résiduels, tel que l'énonce le Règlement sur l'utilisation des terres. Un autre moyen serait de désigner des décharges où les fluides pourraient être transportés par camion. Cette dernière méthode semble s'appliquer tout particulièrement aux activités d'exploration dans le delta du Mackenzie et aux lieux de développement où il y a un certain nombre de puits très rapprochés.

5) Les méthodes de décantation des petits bassins à boue varieraient avec le temps. En hiver, les fluides gelés peuvent être retirés par blocs et transportés par camion à des décharges qui peuvent être d'anciennes ballastières ou des régions dénudées. En été, il est possible de pomper l'eau surnageante.

6) Les métodes de remise en état recommandées varient selon la situation. En hiver, le remblayage, tel que le stipule l'actuel Règlement sur l'utilisation des terres, a l'avantage de causer des perturbations minimes aux terrains, mais pose des difficultés de remplissage et de tassement et entraîne des coûts supplémentaires pour le sautage de la terre gelée de remblayage. Le remblayage estival pose le problème de perturbations importantes du terrain. Le remblayage avec des matériaux dégelés donne cependant de meilleurs résultats et, allié à une décantation estivale des fluides surnageants, pourrait être plus efficace. Dans ce cas, il est essentiel de restreindre les déplacements des véhicules dans la concession et d'utiliser des coussins ou recouvrements de gravier si possible. Dans de telles conditions, la décantation et le remblayage peuvent être autorisés immédiatement après l'achèvement des activités de forage; le meilleur temps pour remblayer un bassin en été est immédiatement après le regel et avant que les matériaux de remblayage ne gèlent et que l'on ne doive les faire sauter.

7) La partie de l'actuel Règlement sur l'utilisation des terres concernant les bassins à boue semble inflexible. Nous avons identifié une variabilité géographique et saisonnière.

a) Variabilité géographique. D'un point de vue purement utilitaire, nous distinguons au moins quatre environnements topographiques: 1) désertes polaires, p. ex. la majeure partie de l'île Prince-Patrick, 2) les "oasis" de toundra de l'Arctique supérieur, p. ex. le sud-ouest de l'île Cameron, 3) le delta moderne du Mackenzie et 4) le delta du Mackenzie du Pléistocène.

Ces milieux ne représentent pas l'ensemble des environnements de l'Arctique canadien, mais reflètent ceux examinés jusqu'ici dans la présente étude. Même si les catégories (iii) et (iv) sont propres aux emplacements, les catégories (i) et (ii) sont de nature pédologique.

Nous sommes d'avis que les bassins à boue ne sont pas nécessaires dans les régions à sol désertique polaire. Dans les oasis de toundra, il faudra respecter les méthodes actuelles d'utilisation des terres ou aménager de petits bassins à boue tout en employant des méthodes de décantation. Dans la partie moderne du delta du Mackenzie, où des crues annuelles se produisent, la construction de bassins à boue n'est pas nécessaire puisqu'il y existe un mécanisme de chasse naturel. Dans la partie du delta datant du Pléistocène, nous recommandons soit l'utilisation de décharges naturelles (ballastières, lacs encaissés sans poisson, etc.), soit la construction de petits bassins à boue et l'emploi concomitant de méthodes de décantation, soit l'aménagement d'un vaste bassin à boue et l'endiguement complet des fluides tel que l'énonce l'actuel Règlement sur l'utilisation des terres.

b) Variabilité saisonnière. Nous sommes d'avis que les méthodes peuvent varier selon la période de l'année (voir les items 5 et 6 ci-dessus). Lorsque les activités s'étalent sur l'été et l'hiver, il peut être nécessaire de planifier des modifications des méthodes d'utilisation des terres pendant les travaux, telles que l'aménagement de routes d'hiver et d'été pour l'élimination par décantation et par transport par camion.

8. BIBLIOGRAPHIE

Argument, R.T., 1973. Specifications for sump construction in the Mackenzie Delta. Shell Canada Limitée, Production Department, Drilling Division, Calgary, 9 p.

Brown, R.J.E., 1978. Pergélisol. Tiré de l'Atlas hydrologique du Canada. Environnement Canada, Ottawa. Planche 32, carte et notes explicatives.

French, H.M. 1978a. Etudes sur les bassins à boue I: Perturbations du terrain. Etude environnementale n° 6, Affaires indiennes et du Nord, Ottawa, 52 p.

---------- 1978b. Terrain and environmental problems of Canadian Arctic oil and gas exploration. Musk-Ox, 21, 11-17.

Heginbottom, J.A., 1973. Effects of surface disturbance upon permafrost. Rapport 73-16, Comité social-écologique, Pipelines du Nord, Groupe de travail sur la mise en valeur des ressources pétrolières du Nord, Information Canada, 29 p.

Hwang, C.T., D.W. Murray et E.W. Brooker, 1972. A thermal analysis for structures on permafrost. Canadian Geotechnical Journal, 9, 33-46.

Johansen, S.O., 1972. Beregningsmetode for varmeledningsevne av fuktige og frosne jordarter (Méthode de calcul de la conductivité thermique des sols), partie II, (avec un résumé en anglais). Frost I Jord, 10, 13-28.

Johnston, G.H. et R.J.E. Brown, 1964. Some observations on permafrost distribution at a lake in the Mackenzie Delta. Arctic, 17, 162-175.

Judge, A.S., 1973. The prediction of permafrost thickness. Canadian Geotechnical Journal, 10, 1-11.

Mackay, J.R., 1974. Seismics shot holes and ground temperatures, Mackenzie Delta area, Northwest Territories. Commission géologique du Canada, Arcticle 74-1A, 389-390.

Smith, M.W., 1977. Computer simulation of microclimatic and ground thermal regimes; test results and computer description. Ottawa, Affaires indiennes et du Nord. ALUR 75-76-72, 74 p.

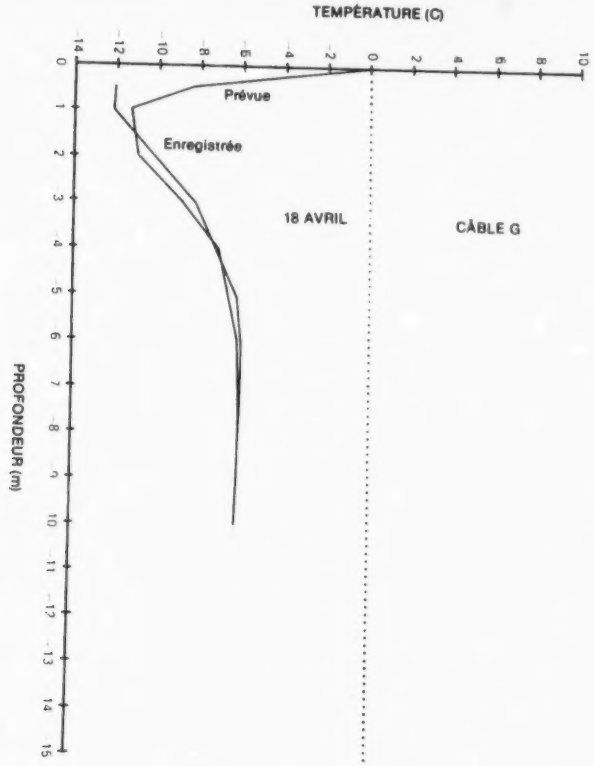
---------- et C.T. Hwang, 1973. Thermal disturbances due to channel shifting, Mackenzie Delta, N.W.T., Canada. Tiré de Permafrost; Contribution nord-américaine, Deuxième Conférence internationale sur le permafrost, Yakutsk, U.R.S.S., Académie nationale des Sciences, Publication 2115, Washington (D.C.), p. 135-155.

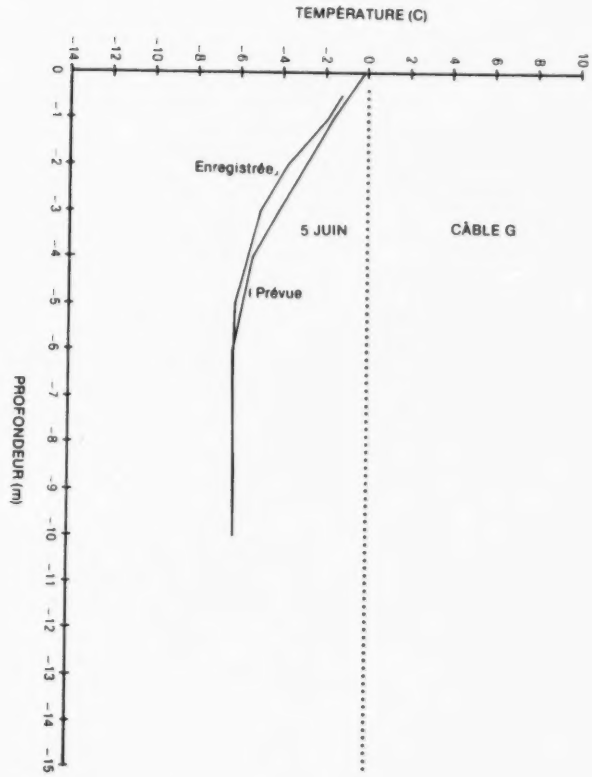
---------- et A. Tvede, 1977. The computer simulation of frost penetration beneath highways. Canadian Geotechnical Journal, 14, p. 167-179.

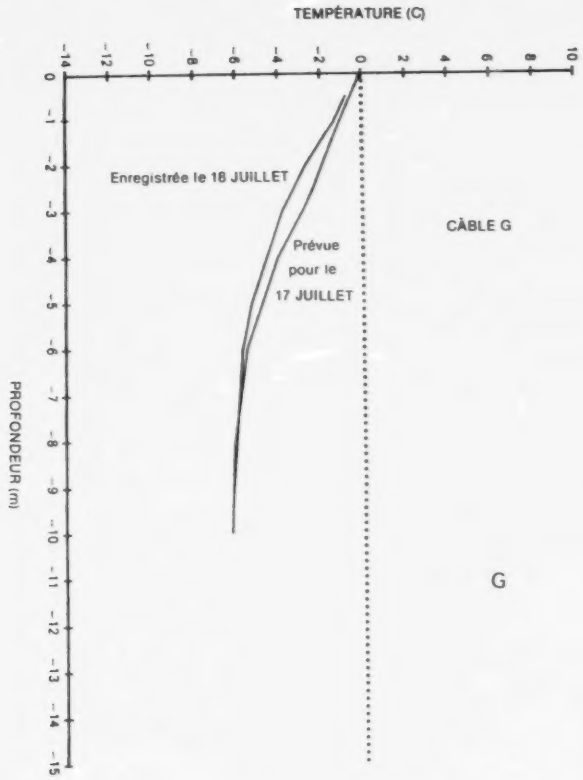
Taylor, A.E. et A.S. Judge, 1977. Canadian geothermal data collection - northern wells, 1976-1977. Série géothermique n^{o} 10, Service des études géothermiques du Canada, Direction de la physique du globe, ministère de l'Energie, des Mines et des Ressources, Ottawa, 194 p.

Tedrow, J.C.F., 1977. Soils of the Polar Landscape. Publié par Rutgers University Press, New Jersey. 638 p.

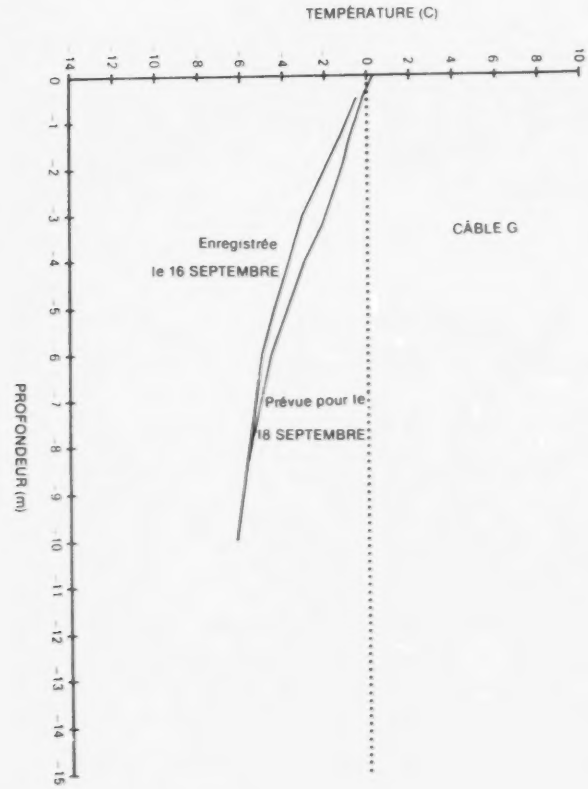
ANNEXE I. Géoisothermes enregistrés et prévus aux câbles G et K, à l'emplacement du puits Ogruknang M-31 de la Gulf, monts Caribou.

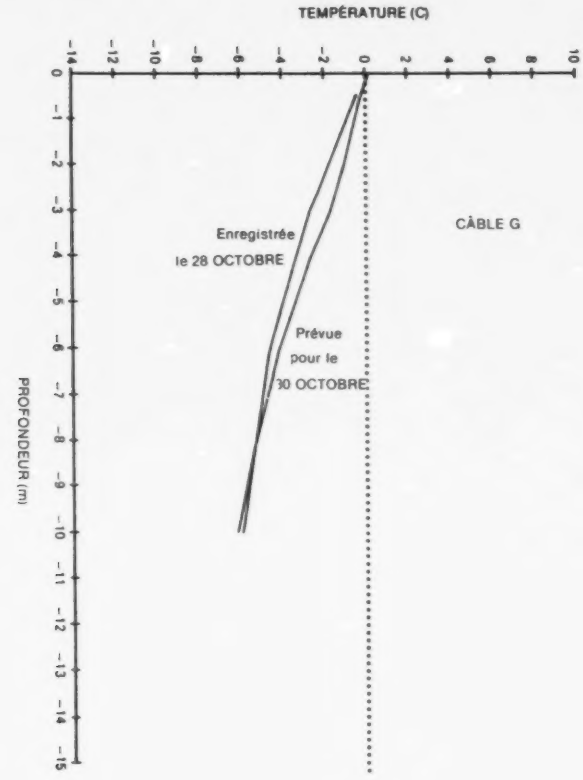

TEMPÉRATURE (C)
Prévue
Enregistrée
18 AVRIL
CÂBLE G
PROFONDEUR (m)

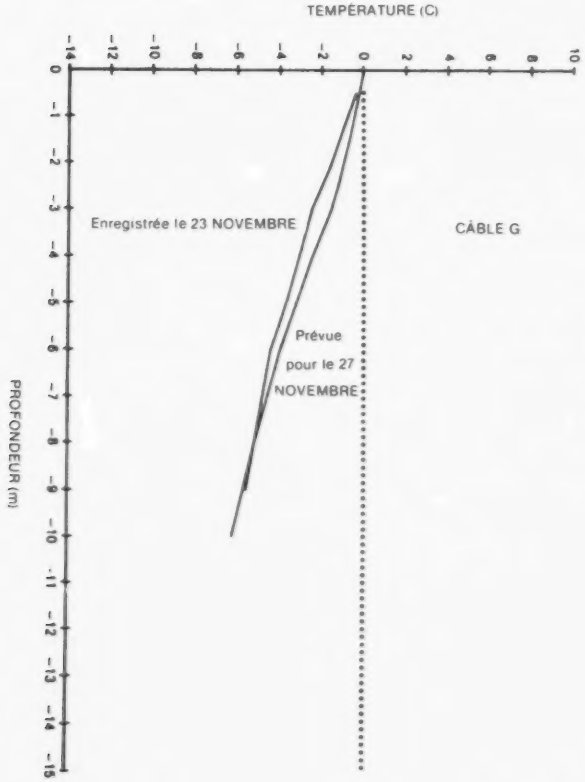

TEMPÉRATURE (C)
Enregistrée
5 JUIN
CÂBLE G
Prévue
PROFONDEUR (m)

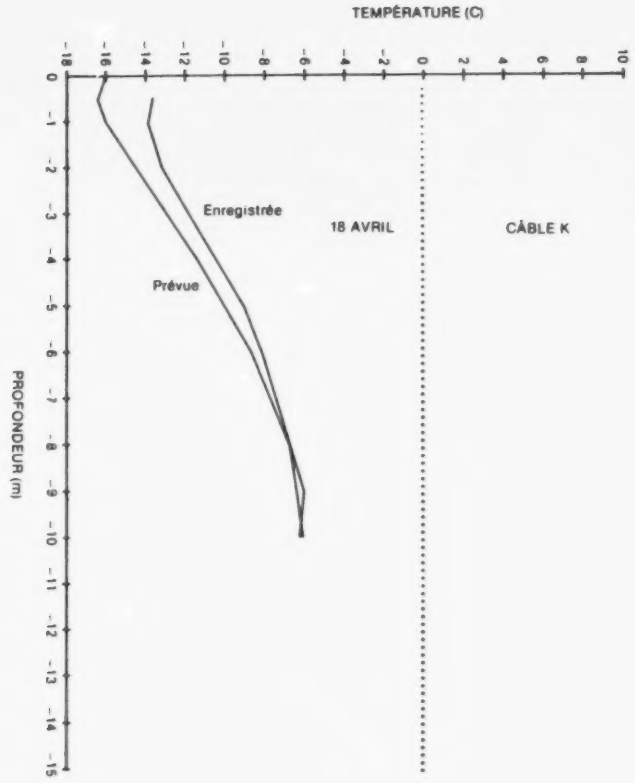

TEMPÉRATURE (C)
PROFONDEUR (m)
Enregistrée le 18 JUILLET
Prévue
pour le
17 JUILLET
CÂBLE G

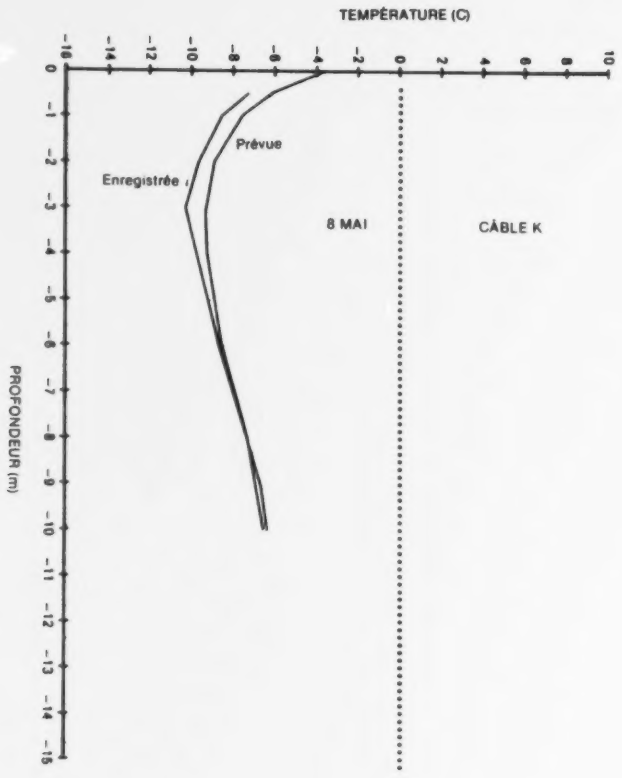
G

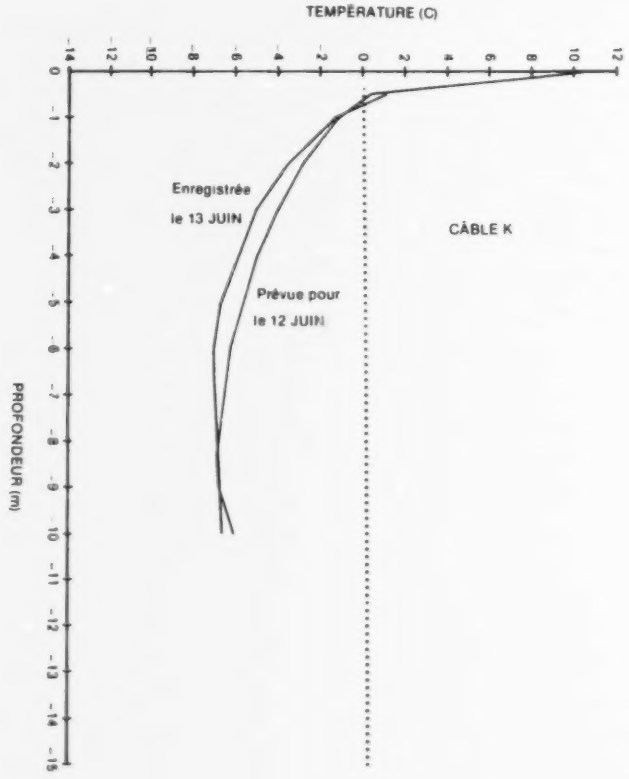

TEMPÉRATURE (C)
PROFONDEUR (m)
Enregistrée
le 16 SEPTEMBRE
Prévue pour le
18 SEPTEMBRE
CÂBLE G

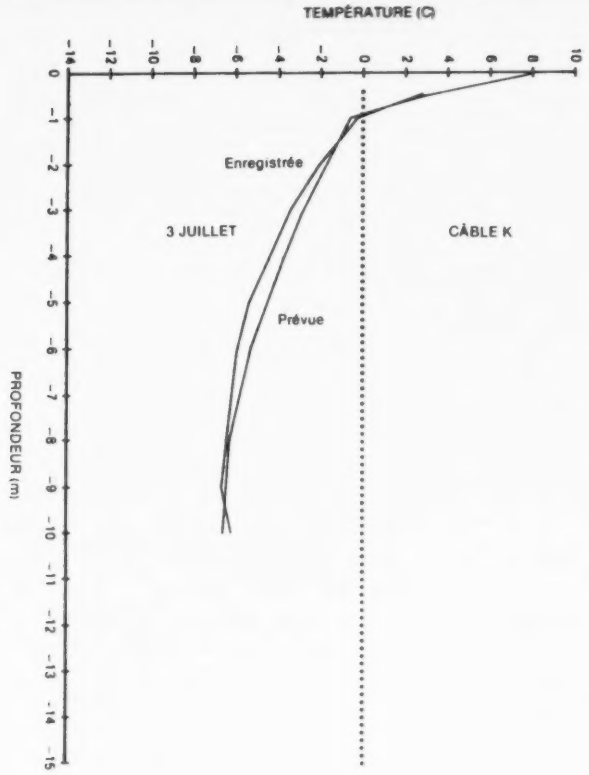

TEMPÉRATURE (C)
PROFONDEUR (m)
Enregistrée
le 28 OCTOBRE
Prévue
pour le
30 OCTOBRE
CÂBLE G

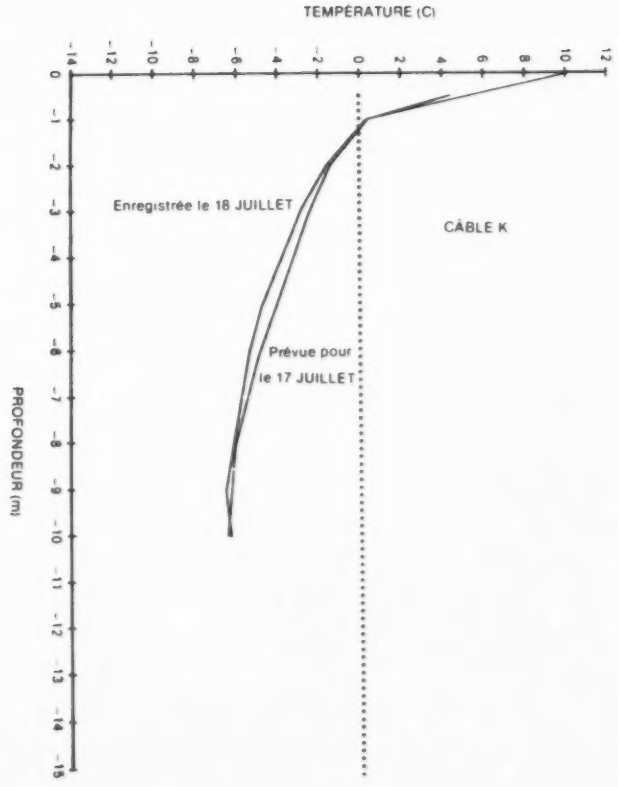

TEMPÉRATURE (C)
PROFONDEUR (m)
Enregistrée le 23 NOVEMBRE
Prévue
pour le 27
NOVEMBRE
CÂBLE G

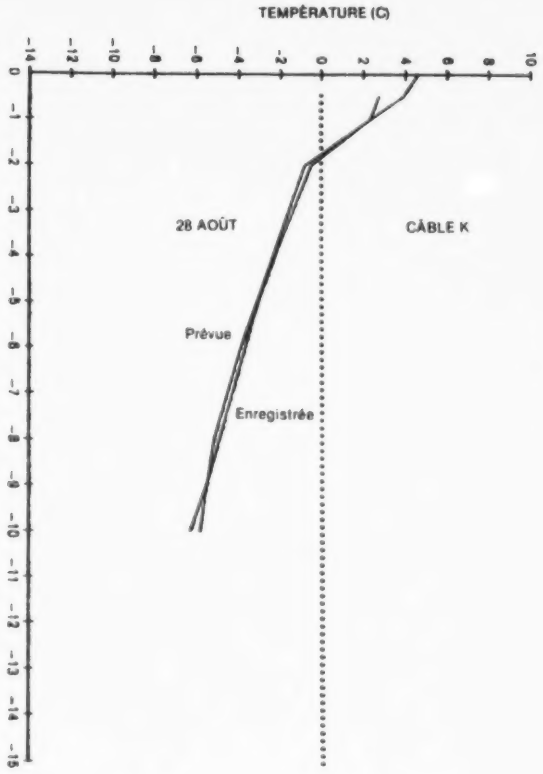

TEMPÉRATURE (C)
-18
-16
-14
-12
-10
-8
-6
-4
-2
0
2
4
6
8
10
0
-1
-2
-3
-4
-5
-6
-7
-8
-9
-10
-11
-12
-13
-14
-15
PROFONDEUR (m)
Enregistrée
Prévue
18 AVRIL
CÂBLE K

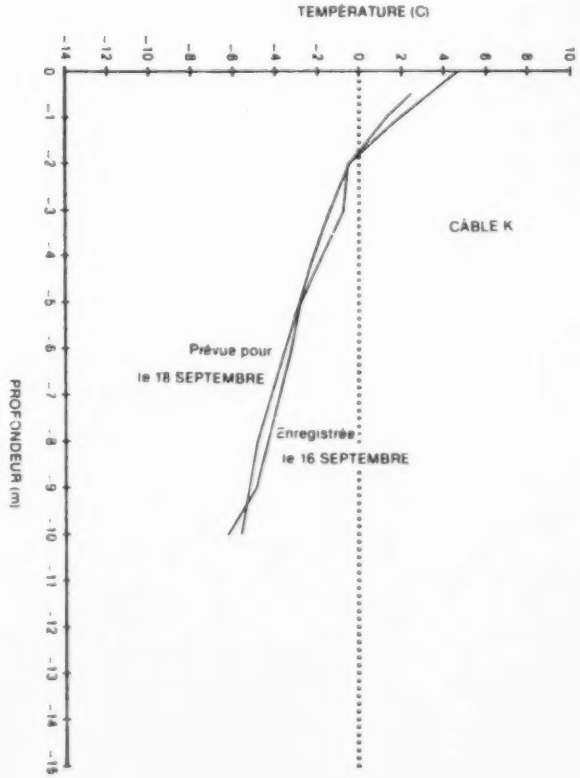

TEMPÉRATURE (C)
PROFONDEUR (m)
Prévue
Enregistrée
8 MAI
CÂBLE K

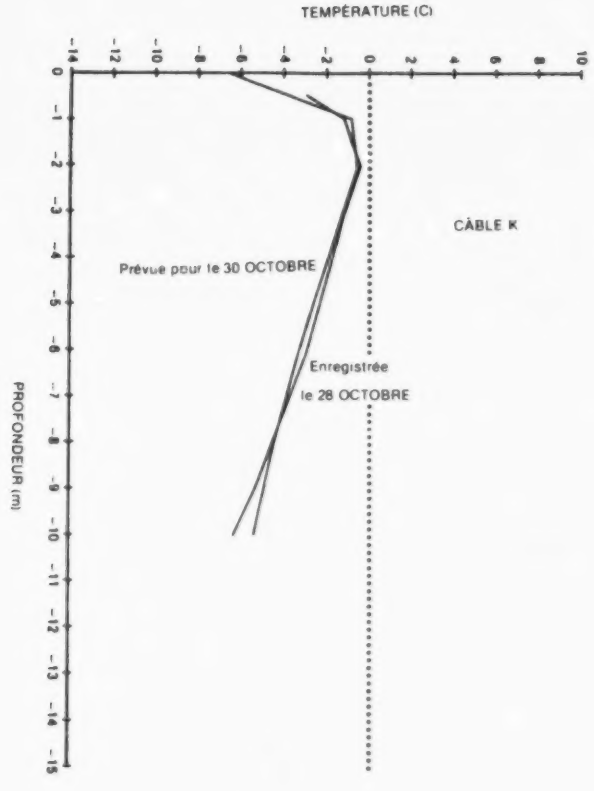

TEMPÉRATURE (C)
PROFONDEUR (m)
Enregistrée
le 13 JUIN
Prévue pour
le 12 JUIN
CÂBLE K

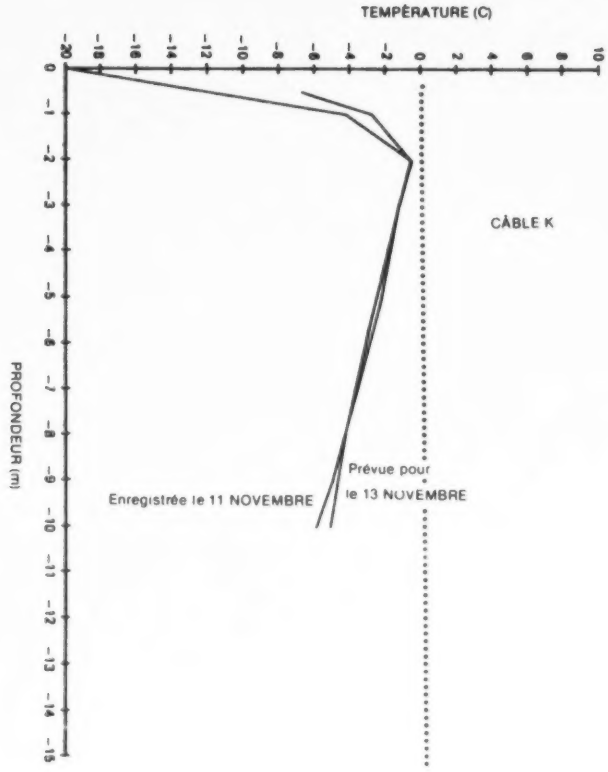

TEMPÉRATURE (C)
PROFONDEUR (m)
Enregistrée
Prévue
3 JUILLET
CÂBLE K

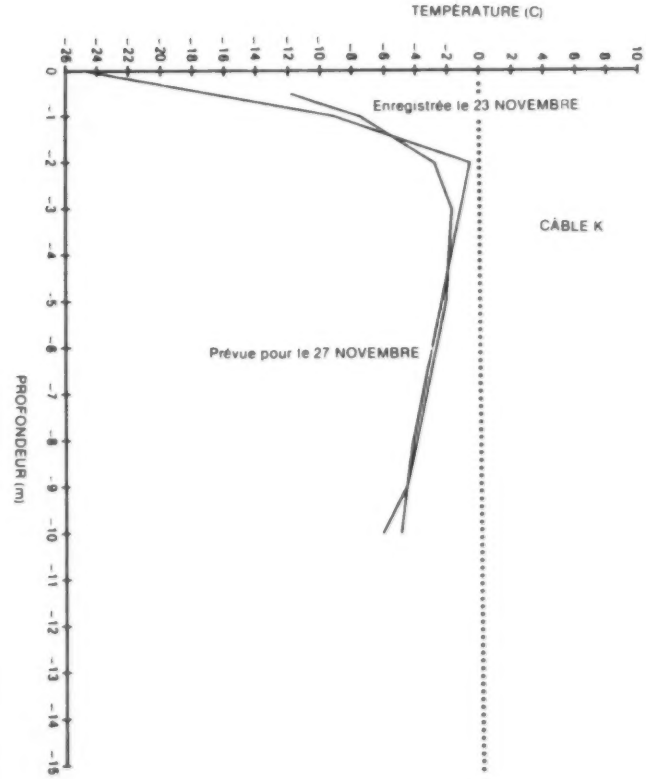

TEMPÉRATURE (C)
PROFONDEUR (m)
Enregistrée le 18 JUILLET
Prévue pour
le 17 JUILLET
CÂBLE K


TEMPÉRATURE (C)
28 AOÛT
CÂBLE K
Prévue
Enregistrée


TEMPÉRATURE (C)
CÂBLE K
Prévue pour
le 18 SEPTEMBRE
Enregistrée
le 16 SEPTEMBRE
PROFONDEUR (m)


TEMPÉRATURE (C)
-14
-12
-10
-8
-6
-4
-2
0
2
4
6
8
10
0
-1
-2
-3
-4
-5
-6
-7
-8
-9
-10
-11
-12
-13
-14
-15
PROFONDEUR (m)
CÂBLE K
Prévue pour le 30 OCTOBRE
Enregistrée
le 28 OCTOBRE


TEMPÉRATURE (C)
PROFONDEUR (m)
CÂBLE K
Prévue pour
le 13 NOVEMBRE
Enregistrée le 11 NOVEMBRE


TEMPÉRATURE (C)
PROFONDEUR (m)
Enregistrée le 23 NOVEMBRE
CÂBLE K
Prévue pour le 27 NOVEMBRE

POOR

QUALITY

ORIGINAL